



**Universidade de Aveiro** Departamento de Engenharia de Materiais e  
Ano 2016 Cerâmica

**Secundino Pedrosa** **Moldes poliméricos porosos para prensagem de**  
**Ferreiro** **pasta plástica de grés**





**Secundino Pedrosa  
Ferreiro**

**Moldes poliméricos porosos para prensagem de  
pasta plástica de grés**

Relatório de estágio apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Materiais (2º Ciclo de Bolonha), realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Augusto Luís Barros Lopes, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro e supervisão de estágio do Engenheiro Carlos Américo Pinto, Diretor Industrial Geral da Grestel.



## **o júri**

Presidente

Professora Doutora Maria Elisabete Jorge Vieira da Costa,  
Professora Auxiliar, Universidade de Aveiro

Professor Doutor Manuel Joaquim Peixoto Marques Ribeiro,  
Professor Adjunto, Instituto Politécnico de Viana do Castelo

Professor Doutor Augusto Luís Barros Lopes, Professor Auxiliar,  
Universidade de Aveiro



## **agradecimentos**

Gostaria de agradecer aos meus pais por todo o apoio que me deram ao longo destes anos de estudo, pelos sacrifícios passados e pela educação que me deram.

Ao Engenheiro Carlos Pinto por me ter aceitado na empresa, pela orientação prestada e pelos ensinamentos passados durante a realização do estágio. Ao Sérgio, ao Reinaldo, ao Mauro e a todos os colaboradores da Grestel que de forma direta ou indireta me ajudaram durante este trabalho. À Doutora Marisa Costa pela preocupação e disponibilidade demonstrada.

Um agradecimento especial ao Professor Doutor Augusto Lopes pelo empenho, dedicação e apoio constantes.

A todos, um muito obrigado.





**palavras-chave**

Grés, molde polimérico poroso, molde gesso, prensagem RAM

**resumo**

Este trabalho, realizado no âmbito de um estágio curricular na empresa Grestel, cuja produção é dedicada ao fabrico peças de louça utilitária e decorativa de grés, teve como objetivo principal a avaliação das vantagens da substituição de moldes de gesso por moldes poliméricos porosos para a conformação por prensagem de pasta plástica.

Para o efeito, foram produzidos moldes em gesso e em polímero poroso que foram utilizados no processo normal de fabrico da Grestel para conformar por prensagem de pasta plástica o mesmo tipo de peça. Foram também caracterizadas as matérias-primas utilizadas na produção de ambos os tipos de moldes utilizando microscopia eletrónica de varrimento, espectroscopia de dispersão de energias, espectroscopia de infravermelhos com transformada de Fourier e difração de raios X. Estas técnicas, juntamente com ensaios mecânicos de compressão e medidas de absorção de água, foram também utilizadas para caracterizar os moldes obtidos.

Os resultados obtidos mostraram que o molde polimérico apresentava uma maior porosidade aberta do que os moldes de gesso, permitindo justificar o menor valor de pressão de ar e tempo necessários para a desmoldagem das peças conformadas com o primeiro tipo de molde.

Concluiu-se ainda que a resistência à compressão do molde polimérico era significativamente superior à do molde de gesso, tendo sido registado durante a conformação com o primeiro tipo de molde uma diminuição das operações de ajuste da espessura das peças e um aumento de, pelo menos 10 vezes, na vida útil do molde.

O menor peso dos moldes poliméricos refletiu-se de forma positiva produtividade e flexibilidade do processo de conformação por prensagem de pasta plástica, em particular na produção de pequenas séries de peças.

Tendo em conta apenas o custo de produção dos moldes e o número de peças conformadas, a substituição dos moldes de gesso por moldes poliméricos mostrou-se economicamente vantajosa para a produção de número elevado de peças ao longo da sua vida útil.



**keywords**

Stoneware, porous polymeric mold, plaster molds, RAM pressing

**abstract**

This work, carried out as part of a curricular internship at the company Grestel, whose production is dedicated to the manufacture of utilitarian and decorative stoneware pieces, had as main objective the evaluation of the advantages of replacing the gypsum molds by porous polymeric molds for plastic ceramic paste pressing conformation.

For this purpose, gypsum and porous polymeric molds were produced which were used in the normal manufacturing process of Grestel to produce the same piece by plastic paste pressing. It was also characterized the raw materials used in the production of both types of molds using scanning electron microscopy, energy dispersive spectroscopy, Fourier transform infrared spectroscopy and X-ray diffraction. These techniques, together with mechanical compression tests and water absorption measurements, were also used to characterize the obtained molds.

The results showed that the polymeric mold had a higher value of open porosity than the gypsum molds, allowing to justify the lower air pressure and time required for demolding the pieces produced with the first type of mold.

It was further concluded that the compression strength of the polymeric mold was significantly higher than that of the gypsum mold, having been observed during the pressing with the first type of mold a decrease in adjustment operations of the pieces thickness and an increase of, at least 10 times, of the life time the mold.

The lower weight of the polymer molds was positively reflected in productivity and flexibility of the plastic past pressing operation, in particular in the production of small series of pieces.

Taking into account only the cost of production of the molds and the number of shaped pieces, the replacement of gypsum molds by polymeric molds is economically advantageous for the production of a large number of pieces.



## Índice

Índice de figuras: .....	2
Índice de Tabelas: .....	4
1. Introdução.....	5
1.1.    Processo de fabrico.....	8
1.1.1.    Matérias-primas.....	9
1.1.2.    Moagem .....	10
1.1.3.    Atomização.....	11
1.1.4.    Filtroprensagem.....	12
1.1.5.    Conformação .....	12
1.1.5.1.    Conformação por via seca .....	12
1.1.5.2.    Conformação por via plástica.....	13
1.1.5.3.    Conformação via líquida.....	18
1.1.5.4.    Secagem.....	22
1.1.5.5.    Cozedura .....	22
1.2.    Empresa Grestel.....	23
2. Realização experimental.....	27
2.1 Materiais iniciais .....	30
2.2. Caracterização dos materiais iniciais e dos moldes.....	31
2.2.1. Microscopia eletrónica de varrimento e espectroscopia de dispersão de energias.....	31
2.2.2. Difração de raios X e espectroscopia de infravermelho.....	32
2.2.3. Ensaio mecânicos de compressão uniaxial.....	32
2.2.4. Medidas de absorção de água.....	33
2.3. Produção dos moldes.....	33
2.3.1. Moldes de gesso.....	33
2.3.2. Moldes poliméricos.....	35
3. Resultados e Discussão.....	41
4. Conclusões.....	67
5. Bibliografia.....	71

## Índice de figuras

Figura 1 - Processo geral de produção dos produtos cerâmicos argilosos.....	9
Figura 2 - Representação esquemática de um atomizador.....	12
Figura 3 – Representação esquemática de uma extrusora. ....	13
Figura 4 - Extrusão de pasta cerâmica.....	14
Figura 5 - Contra-moldagem saladeiras. ....	15
Figura 6 - Etapas do processo de conformação por prensagem RAM. ....	16
Figura 7 - Efeito da relação água/gesso nas características do molde de gesso. ....	18
Figura 8 - Conformação por enchimento tradicional. ....	19
Figura 9 - Mesas de trabalho da secção de olaria.....	19
Figura 10 - Máquina para conformação por enchimento sob pressão.....	20
Figura 11 - Ilustração esquemática da ação da substância tensioativa na obtenção de uma emulsão de água em óleo.....	21
Figura 12 - Entrada da instalação fabril da Grestel.....	23
Figura 13 - Fluxograma geral de fabrico da Grestel. ....	24
Figura 14 - Imagem das peças utilizadas para a avaliação do desempenho de moldes de gesso e poliméricos porosos para prensagem de pasta plástica. a) Peça WMR291; b) Peça LSP211.....	30
Figura 15 - Sistema de tubagem (cofinho) utilizado na produção dos moldes de gesso.....	33
Figura 16 - Equipamento utilizado para a mistura e agitação da calda.....	34
Figura 17 - Vazamento da calda para o interior da caixa metálica.....	35
Figura 18 - Etapa final de injeção de ar comprimido durante o processo de produção dos moldes de gesso.....	35
Figura 19 - Madre com caixa de enchimento.....	36
Figura 20 - Grelha com a colocação das varetas.....	36
Figura 21 - Mistura do componente B com água.....	37
Figura 22 - Colocação de grelha com varetas e termómetro.....	38
Figura 23 - Conjunto de sulcos obtidos por maquinaria da base do molde polimérico para interligação do sistema de canais definidos pelas varetas metálicas. ....	38
Figura 24 - Lavagem de molde polimérico com água e ar. ....	39
Figura 25 - Impermeabilização do molde com esmalte sintético. ....	39
Figura 26 - Imagem obtida por microscopia eletrónica de varrimento do pó inicial de Gesso A, utilizado para a produção da metade inferior dos moldes de gesso. ....	43
Figura 27 - Imagem obtida por microscopia eletrónica de varrimento do pó inicial de Gesso B, utilizado para a produção da metade superior dos moldes de gesso.....	44
Figura 28 - Espectro de EDS do pó inicial do Gesso A.....	44
Figura 29 - Espectro de EDS do pó inicial do Gesso B.....	45
Figura 30 - Difractograma de raios X do pó inicial do Gesso A. ....	45
Figura 31 - Difractograma de raios X do pó inicial do Gesso B.....	46
Figura 32 - Imagens obtidas por microscopia eletrónica de varrimento do Componente B utilizado para a produção dos moldes poliméricos.....	47
Figura 33 - Espectro de EDS do Componente B utilizado na produção dos moldes poliméricos.....	48
Figura 34 - Difractograma de raios X do Componente B utilizado na produção dos moldes poliméricos.....	48
Figura 35 – Espectro FTIR do Componente A utilizado na produção dos moldes poliméricos.....	49
Figura 36 - Espectro FTIR do Componente B utilizado na produção dos moldes poliméricos.....	50
Figura 37 - Imagem obtida por microscopia eletrónica de varrimento da metade inferior do molde (produzida com o Gesso A) .....	51

Figura 38 - Imagem obtida por microscopia eletrônica de varrimento da metade superior do molde (produzida com o Gesso B) .....	51
Figura 39 - Espectro de EDS da metade inferior do molde (produzida com o Gesso A) .....	52
Figura 40 - Espectro de EDS da metade inferior do molde (produzida com o Gesso B).....	53
Figura 41 – Difratoograma de raios X da metade inferior do molde (produzida com o Gesso A).....	53
Figura 42 – Difratoograma de raios X da metade superior do molde (produzida com o Gesso b).....	54
Figura 43 – Imagens do molde polimérico obtidas por microscopia eletrônica de varrimento .....	55
Figura 44 – Difratoograma de raios X do molde polimérico.....	56
Figura 45 – Espectro de EDS obtido no molde polimérico.....	56
Figura 46 – Espectro FTIR do molde polimérico.....	57
Figura 47 – Curva tensão-extensão nominais em compressão uniaxial de amostras dos gessos e do polímeros.....	59
Figura 48 – Fissuração da metade inferior de um molde de gesso.....	60
Figura 49 – Defeito na zona do frete numa peça (WMR291), devido a fissuração do molde de gesso.....	61
Figura 50 – Peça LSP211 conformada com molde polimérico antes da operação de acabamento do bordo.....	62
Figura 51 – Fêmea molde de gesso utilizado na produção da peça WMR291.....	63
Figura 52 – Operação de recuperação da caixa metálica de um molde de gesso.....	64

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Características e composição típicas de produtos de loiça utilitária e decorativa.....	7
Tabela 2 - Tabela 2 - Características típicas do gesso $\alpha$ e do gesso $\beta$ .....	17
Tabela 3 - Absorção de água dos moldes de gesso e polimérico.....	58
Tabela 4 - Pressão de ar de desmoldagem utilizada na conformação da peça LSP211. ....	58
Tabela 5 - Estimativa dos custos de produção totais e por peça conformada (LSP211) dos moldes de gesso e polimérico.....	65



## **1. Introdução**



A mistura de matérias-primas e a conformação manual de produtos cerâmicos remonta a cerca de 5000 anos a.C.. Nos dias de hoje, o processo é muito mais complexo e mecanizado, resultado de uma busca contínua da melhoria dos produtos e da eficiência do processo produtivo.

Dependendo das características finais, os produtos cerâmicos argilosos de loiça utilitária e decorativa podem ser classificados em loiça de porcelana, de grés, de faiança e de barro vermelho (tabela 1). A porcelana tem como principais características a elevada translucidez e resistência mecânica, cor branca e uma porosidade praticamente nula, sendo cozida a uma temperatura entre os 1300 °C e 1400 °C.. O grés apresenta uma elevada resistência mecânica e química, cor variável e uma reduzida absorção de água após cozedura a uma temperatura de aproximadamente 1200 °C. Por sua vez, a faiança é produzida a partir de uma pasta de cor branca ou ligeiramente corada que, após cozedura a entre 1050 °C e 1200 °C, apresenta uma absorção de água entre 10 e 15%. Por fim, a loiça de barro vermelho é obtida a partir de pastas menos cuidadas, de cor geralmente vermelha, que cozem a uma temperatura de cozedura relativamente reduzida e apresenta uma elevada porosidade.

Tabela 1 – Características e composição típicas de produtos de loiça utilitária e decorativa [1].

Tipo de produto	Características e composição típicas
Porcelana	Temperatura de cozedura – 1300 °C -1400 °C Absorção de água < 0,5% Caulino – 35% - 45% Argilas plásticas – 5% - 10% Feldspato – 25% - 35% Quartzo – 20% - 25%
Grés	Temperatura de cozedura – 1100 °C – 1250 °C Absorção de água – < 3% Caulino – 15-45% Argila plástica -12-38% Feldspato – 27-48% Quartzo – 5-18%

Tabela 1 (cont.) – Características e composição típicas de produtos de loiça utilitária e decorativa [adaptado de 1].

Tipo de produto	Características e composição típicas
Faiança	Temperatura de cozedura – 1050 °C-1100 °C Absorção de água – 10% a 15% Caulino – 10-35% Argilas plásticas – 20 a 25% Calcite ou dolomite – 25 a 35% (faiança calcítica ou dolomítica) Feldspato – 10 a 20% (faiança feldspática) Quartzo – 10 a 130%
Barro vermelho	Temperatura de cozedura – 900 °C -1050 °C Absorção de água – 20% a 25% Argilas plásticas e quartzo

### 1.1. Processo de fabrico

Até se obter a peça final é necessário que um conjunto de processos sejam realizados (Figura 1). Para qualquer produto de loiça cerâmica, em primeiro lugar são escolhidas as matérias-primas a utilizar. De seguida faz-se a dosagem e a mistura e, se necessário, a moagem das mesmas. No caso da moagem em húmido, obtém-se uma suspensão com cerca de 35% de humidade (barbotina) que pode ser utilizada diretamente ou após um processo de redução do teor de humidade por filtro-prensagem ou de atomização. No caso da filtro-prensagem obtém-se uma pasta plástica com cerca de 20% de humidade. No caso da atomização, obtém-se um pó ou granulado com um teor em humidade de aproximadamente 5%. A próxima etapa do processo de produção é a conformação. Antes da cozedura as peças são secas para eliminar a humidade que ainda possuem após a conformação. Por fim, as peças podem ser submetidas a processos de acabamento, como a vidragem e a decoração.

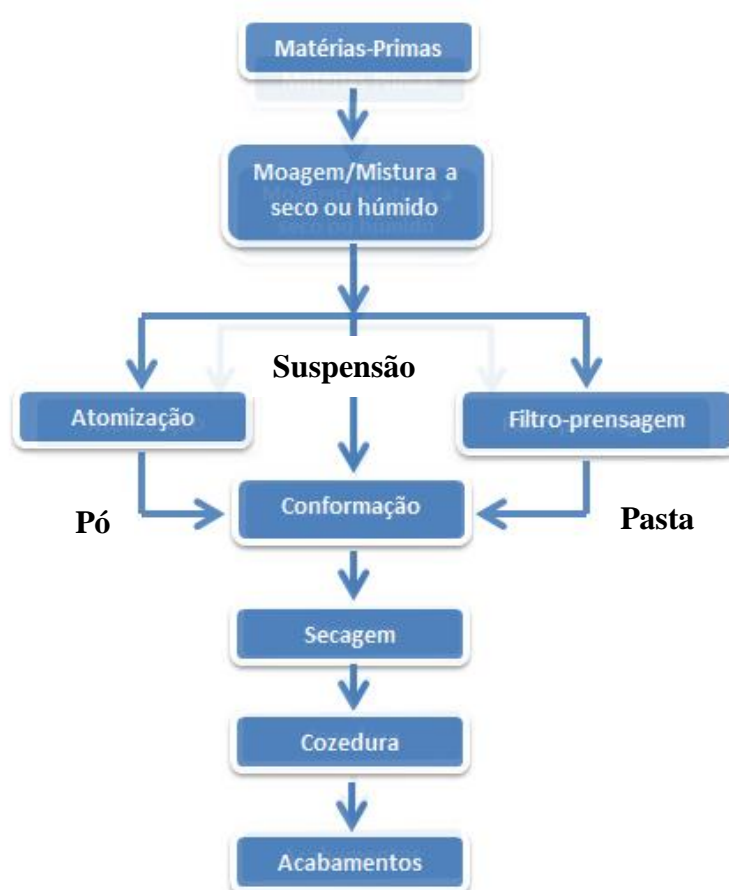


Figura 1 - Processo geral de produção dos produtos cerâmicos argilosos.

#### 1.1.1. Matérias-primas

A seleção das matérias-primas para a produção de um dado produto cerâmico é de extrema importância e é condicionada pelo custo do material, processo de fabrico e características pretendidas para o produto final [2]. As matérias-primas utilizadas na produção de cerâmicos argilosos podem ser classificadas em 3 grupos principais: plastificantes, fundentes e inertes.

Os plastificantes ou argilas são matérias-primas que, quando misturadas com água, conferem plasticidade à mistura. Eles são responsáveis pela trabalhabilidade da pasta, permitindo obter a forma desejada. As argilas são essencialmente constituídas por filossilicatos, cuja estrutura é definida por um arranjo sequencial de camadas tetraédricas de  $\text{Si}_2\text{O}_5^{2-}$  e octaédricas de

$[\text{Al}_2(\text{OH})_4]^{2+}$ , que apresentam uma reduzida dimensão (inferior a 2  $\mu\text{m}$ ) e forma geralmente lamelar. Entre os vários tipos de filossilicatos, os mais importantes para a indústria cerâmica tradicional são a caulinite, a ilite e a montmorilonite. Na produção de alguns materiais cerâmicos, especialmente de barro vermelho, bastam duas argilas para a mistura, pois contém todos os minerais necessários ao fabrico. Em outros casos é necessário combinar várias matérias-primas em proporções controladas [3, 4].

Os fundentes têm como principal objetivo promover a formação de uma fase líquida durante a cozedura. Esta fase líquida facilita o transporte de matéria e preenche os poros, promovendo a densificação e consolidação da peça. Os principais fundentes são o feldspato (potássico -  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ , sódico -  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$  e cálcico -  $\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$ ), a calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) e a dolomite ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) [1, 3-6].

Os materiais inertes são utilizados para facilitar o processo de secagem do corpo cerâmico e evitar retrações excessivas durante a secagem e cozedura. O inerte mais utilizado é o quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) na forma de areia [1, 5-7].

### **1.1.2. Moagem**

O objetivo da moagem é reduzir o tamanho das partículas duras (fundentes e inertes) de forma a facilitar a homogeneização das matérias-primas e aumentar a superfície específica das partículas, tendo em vista incrementar a reatividade da mistura durante a cozedura. O tamanho de partícula é muito importante na obtenção das características desejadas no final do processo. A moagem pode ser a seco ou a húmido. A escolha do tipo de moagem depende do processo escolhido e das características pretendidas para o produto final. A moagem por via húmida possibilita um maior grau de homogeneização das matérias-primas mas envolve custos de produção adicionais na eliminação posterior do excesso de água utilizado nesta etapa do processo.

Alguns fatores que influenciam o rendimento da moagem são: a dimensão e forma inicial das partículas, dureza do material, grau de humidade e a tendência para a aglomeração [4-6, 8-9].

### 1.1.3. Atomização

Caso se queira obter um pó cerâmico para posterior conformação, a técnica geralmente utilizada é a atomização. Este é um processo de transformação, onde a suspensão aquosa das matérias-primas é pulverizada no interior de uma câmara onde circula uma corrente de ar seco e quente. Durante a queda a humidade das gotículas é quase totalmente eliminada por evaporação, obtendo-se um pó. A forma dessas partículas depende muito das propriedades da suspensão, das características do atomizador e das condições de operação [10-13]. Um atomizador é constituído por um sistema de pulverização da suspensão, um sistema de aquecimento e controlo do ar de secagem, um sistema de injeção e controlo de caudal da suspensão, um sistema de alimentação de ar para secagem, câmara de secagem e um sistema de separação do pó seco do ar de secagem (Figura 2).

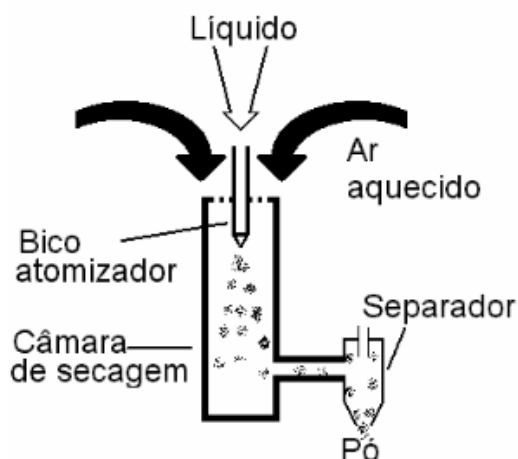


Figura 2 – Representação esquemática de um atomizador [12].

#### **1.1.4. Filtroprensagem**

Para a obtenção de pastas plásticas partindo de uma suspensão, é geralmente utilizado o processo de filtroprensagem. Antes do processo de conformação por via plástica é necessário retirar grande parte da água utilizada na moagem e mistura das matérias-primas, formando assim uma pasta plástica que posteriormente pode ser extrudida e conformada. As filtroprensas são constituídas por uma série de placas separadas por telas filtrantes. A suspensão é bombardeada e forçada a passar pelas telas filtrantes, formando um depósito sólido constituído pelas partículas da suspensão com cerca de 20% de humidade [14].

#### **1.1.5. Conformação**

A seleção do processo de conformação depende da forma das peças e custos de produção. Em função do teor de humidade do material, pode-se dividir estes processos em conformação por via seca, conformação de pasta plástica e conformação por via líquida.

##### **1.1.5.1. Conformação por via seca**

Conformação por via seca é efetuada utilizando-se pós com um teor de humidade entre 1 e 10%. Neste processo, as partículas são vazadas para dentro de uma cavidade (molde) e são comprimidas por um punção (prensagem unidirecional) ou membrana (prensagem isostática) promovendo fenómenos de rearranjo, deformação plástica e fratura das partículas e originando um compacto com a forma da cavidade. A densidade da peça obtida depende da pressão exercida e das características do pó (tamanho, distribuição de tamanhos, forma, dureza, etc.).

A quantidade de matéria-prima a ser colocada na cavidade é previamente calculada, podendo o enchimento da matriz ser manual ou mecânico. A prensagem uniaxial é limitada a formas simples, sendo geralmente



utilizada na conformação de peças planas. A conformação por prensagem isostática permite a conformação de formas um pouco mais complexas e uma maior uniformidade da densidade da peça que se traduz numa melhoria das propriedades das peças finais [15].

#### 1.1.5.2. Conformação por via plástica

Na conformação por via plástica é utilizada pasta plástica que, por ação de forças mecânicas é moldada com a forma pretendida. Este tipo de conformação inclui a extrusão, a contramoldagem e a prensagem.

##### a) Extrusão

A extrusão é um processo de conformação na qual a pasta é forçada a escoar por um orifício (fieira) com a forma desejada. Esta operação é geralmente realizada em vácuo para promover a desgaseificação da pasta e evitar a formação de defeitos devido à presença de bolhas de ar nas peças (Figura 3). É uma técnica muito utilizada na fabricação de tijolos, tubos, entre outros. Apresenta uma elevada produtividade, mas não possibilita a fabricação de peças com formas complexas [1,2].

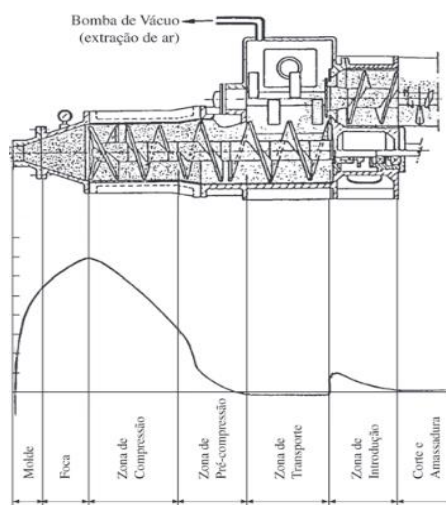


Figura 3 – Representação esquemática de uma extrusora [8].

Na indústria de cerâmica utilitária e decorativa este processo é utilizado para extrudir pasta plástica que será posteriormente utilizada em outros método de conformação, como prensagem ou contramoldagem. Neste caso, a pasta extrudida tem geralmente a forma de cilindros ou paralelepípedos a partir dos quais são cortados as quantidades necessárias às operações posteriores de conformação (Figura 4).



Figura 4 – Extrusão de pasta cerâmica.

#### **b) Contramoldagem**

Neste processo de conformação por via plástica, a pasta é comprimida contra a superfície de moldes de gesso por uma lâmina ou cabeça metálica adquirindo, por deformação tangencial, a forma da superfície do molde e da lâmina ou cabeça (Figura 5). A retração da peça durante a secagem permite a sua fácil desmoldagem do molde de gesso. Este processo está limitado à conformação de peças com um eixo de revolução como, por exemplo, pratos e chávenas [5].



Figura 5 – Processo de contramoldagem.

### **c) Prensagem de pasta plástica**

A prensagem de pasta plástica ou prensagem RAM consiste na conformação por prensagem de uma pasta plástica utilizando um molde permeável (geralmente em gesso) constituído por duas peças. Nesta técnica, a matéria-prima é colocada no molde inferior, depois é aplicada uma pressão entre as duas partes do molde que, por esmagamento, confere a forma da cavidade interna à pasta (Figura 6). A desmoldagem da peça conformada envolve a injeção de ar, primeiro na parte inferior e depois na parte superior do molde.

No processo de prensagem de pasta plástica existe a necessidade de humedecer a superfície do molde de forma a controlar a adesão da pasta por ação das forças capilares e facilitar a desmoldagem da peça. Esta quantidade de água no interior dos poros terá de ser reposta sempre que se verificar que o molde se encontra demasiado seco e a desmoldagem fica dificultada. A pasta plástica deve ter uma boa capacidade de escoamento no interior do molde durante o ciclo de prensagem e o excesso de pasta (apara) deve fluir entre as duas partes do molde para depois ser removido pelo operador. Posteriormente,

estes excessos de pasta são reintroduzidos no processo de fabrico após extrusão e, se necessário, ajuste do teor de humidade.

A pressão de prensagem aplicada durante o processo depende de alguns fatores, tais como, as características reológicas da pasta, espessura e forma da peça. No final da conformação, a peça obtida é submetida a uma operação de acabamento para eliminação de rebarbas por raspagem e alisamento com esponja. Atualmente, os moldes utilizados são produzidos em gesso.

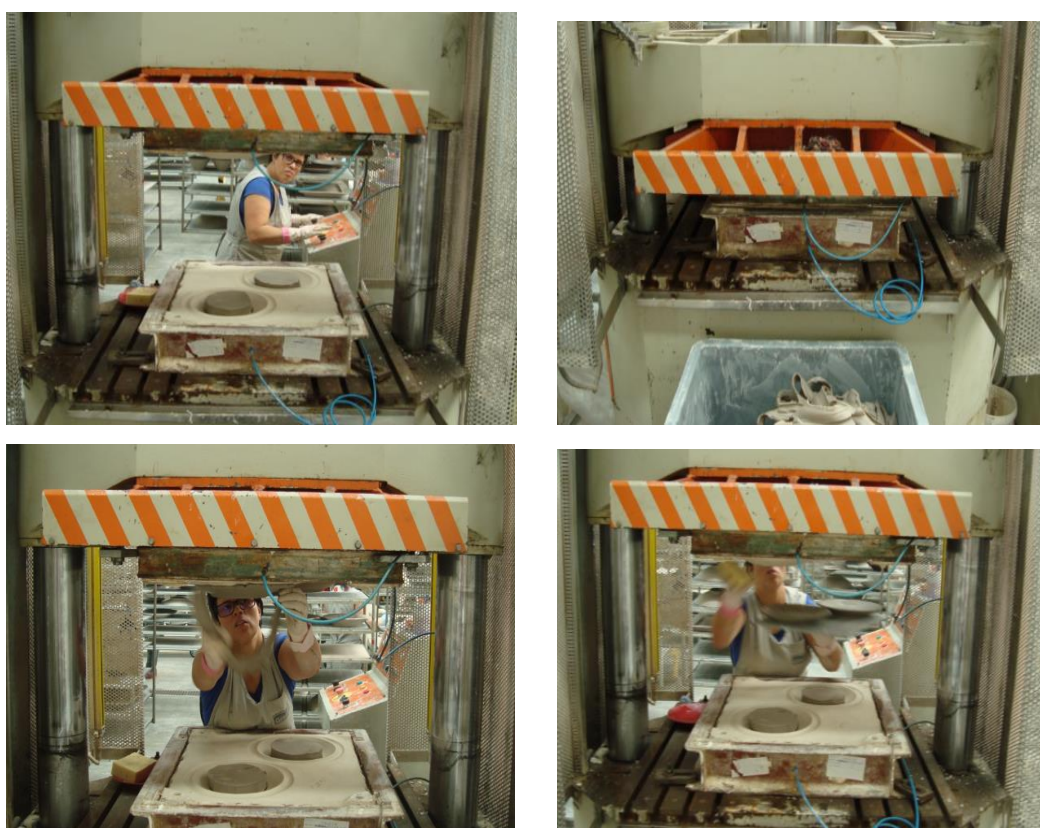


Figura 6 - Etapas do processo de conformação por prensagem RAM.

O gesso utilizado para a produção dos moldes utilizados neste processo é obtido a partir da moagem e posterior calcinação da gipsita. Neste processo ocorre a desidratação da gipsita, formando-se o sulfato de cálcio (gesso) hemi-hidratado de acordo com a reação seguinte [16]:



Quando o sulfato de cálcio hemi-hidratado entra em contacto com água ocorre a reação inversa, dando origem a uma estrutura porosa constituída por cristais alongados de sulfato de cálcio di-hidratado.

Dependendo das condições de calcinação, a desidratação da gipsita pode originar gesso  $\alpha$  ou gesso  $\beta$ . Mais concretamente, à pressão atmosférica e a uma temperatura de aproximadamente 120 °C, ocorre a formação de gesso  $\beta$ . A fase  $\alpha$  é formada se a decomposição ocorrer a cerca de 175 °C e a uma pressão de 7-8 bar, numa atmosfera saturada de vapor de água. O gesso  $\beta$  possui maior área superficial específica devido à reduzida granulometria e forma mais irregular dos seus cristais. Pelo contrário, os cristais do gesso  $\alpha$  são maiores e mais regulares. Estas diferenças originam, após hidratação, moldes com propriedades diferentes (tabela 2), em particular ao nível da resistência mecânica (superior para os moldes obtidos com gesso alfa). A preparação de moldes com as características mais indicadas para um dado processo de conformação envolve, frequentemente, a utilização de uma mistura de ambos os tipos de gesso [15].

Tabela 2 - Características típicas do gesso  $\alpha$  e do gesso  $\beta$  [15].

Características		Gesso $\alpha$	Gesso $\beta$
Resistência à compressão	húmido, kg/cm <sup>3</sup>	170	40
	seco, kg/cm <sup>3</sup>	380	90
Resistência à flexão	húmido, kg/cm <sup>3</sup>	55	18
	seco, kg/cm <sup>3</sup>	110	40

A produção do molde cerâmico em gesso hemi-hidratado inicia-se com a adição de gesso a uma determinada quantidade de água, de forma a obter-se uma suspensão homogénea designada por “calda”. O processo de hidratação origina a rede interconectada de cristais alongados de sulfato de cálcio di-hidratado que se traduz num aumento progressivo da viscosidade da calda. Este processo, designado por “presa”, ocorre com aumento da temperatura do

sistema devido à libertação de calor da reação de hidratação. O excesso de água utilizado na obtenção da calda é posteriormente eliminado por secagem, dando origem a uma estrutura interligada de canais que confere a permeabilidade ao molde. O efeito da relação água/gesso da calda inicial na porosidade, resistência à compressão e absorção de água do molde cerâmico após a secagem é apresentado na Figura seguinte.

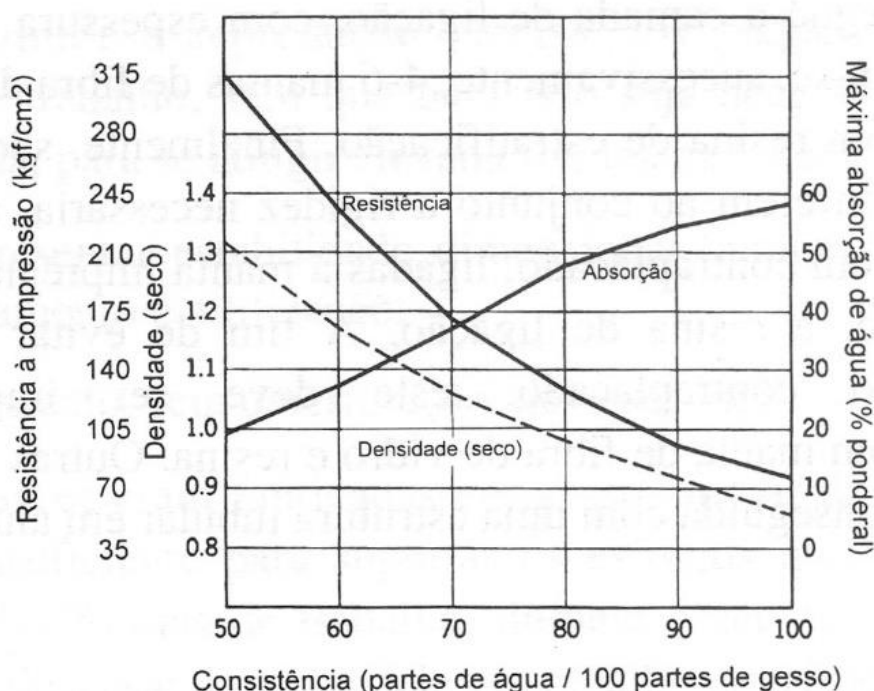


Figura 7 – Efeito da relação água/gesso nas características do molde de gesso [15].

### 1.1.5.3. Conformação via líquida

Na conformação por via líquida é utilizada uma suspensão das matérias-primas com cerca de 35% de humidade. Esta água é progressivamente eliminada através de um molde poroso, originando a deposição das partículas sólidas até se obter a espessura de parede desejada. O processo pode ocorrer sem (enchimento tradicional) ou com (enchimento sob pressão) a aplicação de pressão externa à suspensão.



### a) Enchimento convencional

O enchimento convencional é uma técnica de conformação que envolve o vazamento da suspensão para o interior de um molde poroso de gesso que, por ação de forças capilares, absorve água e deposita as partículas sólidas na superfície do molde em contacto com a suspensão. Esse depósito constitui a parede da peça que se quer conformar (Figura 6) e cuja espessura depende do tempo de contacto da barbotina com o molde, porosidade do molde, densidade da suspensão e permeabilidade da parede formada. Após a obtenção da parede com a espessura pretendida, o excesso de suspensão utilizado no processo é vazado [1,2].

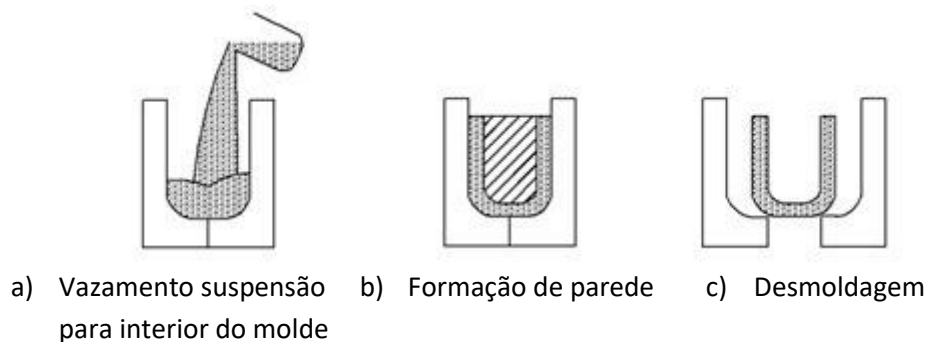


Figura 8 – Conformação por enchimento tradicional.



Figura 9 – Mesas de trabalho da secção de olaria.

## **b) Enchimento sob pressão**

O enchimento sob pressão é uma técnica bastante utilizada na indústria cerâmica para a produção de louça decorativa e utilitária. Neste processo, são utilizados moldes poliméricos porosos para onde é injetada a suspensão sob uma pressão hidrostática que promove o escoamento da água pelo molde, formando a peça. Após conformação, a pressão é retirada, o molde é aberto e é injetado ar comprimido e água através da rede de poros do molde para facilitar a desmoldagem da peça e, simultaneamente, promover a limpeza do molde.

As variáveis do processo são a pressão aplicada (que pode variar entre 3 e 40 bar) o tempo de enchimento (que é, tipicamente, de 20 a 200 segundos, dependendo da peça a conformar e do tempo de formação da parede), da porosidade do molde, permeabilidade da parede formada e propriedades reológicas da suspensão. Esta técnica de conformação permite uma elevada taxa de produção mas a sua utilização é geralmente limitada a formas relativamente simples.



Figura 10 - Máquina para conformação por enchimento sob pressão.

O enchimento sob pressão requer a utilização de moldes com elevada resistência mecânica, de forma a suportarem as elevadas pressões aplicadas durante o processo de conformação da peça. Isto obriga à substituição dos moldes de gesso, geralmente utilizados na conformação por prensagem de



pasta plástica ou por enchimento convencional, por moldes poliméricos porosos. Estes moldes são frequentemente obtidos a partir de um processo heterogêneo de polimerização em emulsão de resinas epóxis, resinas acrílicas (como, por exemplo o poli(metil metacrilato) – PMMA) ou poliésteres [17-20]. Neste processo, é obtida uma emulsão através da mistura de dois líquidos imiscíveis (geralmente água e um líquido contendo o monômero) na presença de um agente emulsionante. O líquido com o monômero forma uma fase contínua contendo a água dispersa na forma de gotículas. Dependendo da quantidade, tamanho e distribuição das gotículas, a eliminação da água por secagem após o processo de polimerização por ação de um iniciador, dará origem a uma rede de canais interconectados que conferirá permeabilidade ao molde [20-22].

Durante a polimerização, a estabilidade da emulsão é conseguida pela presença do agente emulsionante que é uma substância tensioativa, geralmente de natureza orgânica, que contém grupos hidrofílicos e hidrofóbicos nas extremidades das suas cadeias. A extremidade hidrofílica liga-se às moléculas de água enquanto que a extremidade hidrofóbica tem tendência a ligar-se às moléculas da segunda fase (Figura 11), permitindo obter uma dispersão de ambas as fases na forma de emulsão.

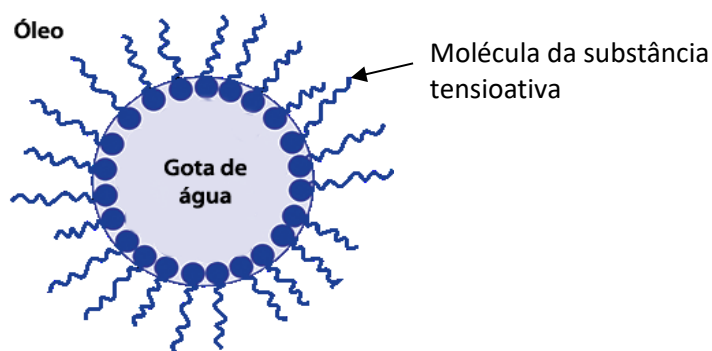


Figura 11 – Ilustração esquemática da ação da substância tensioativa na obtenção de uma emulsão de água em óleo.

#### **1.1.5.4. Secagem**

Após a conformação é necessário eliminar a água residual das peças antes da etapa de cozedura. Para fazer esta secagem são utilizadas câmaras que podem ser do tipo intermitente ou contínuo. No primeiro caso, as peças entram na câmara e ficam imoveis durante todo o processo de secagem que ocorre por exposição a um fluxo contínuo de ar com uma temperatura e humidade relativa controladas. No caso do secador contínuo, as peças estão em movimento durante a secagem, entrando numa extremidade da câmara de secagem em contracorrente com o fluxo de ar quente e seco. Desta forma, as peças húmidas entram em contacto com ar progressivamente mais quente e seco, evitando a fissuração das peças durante o processo de secagem.

#### **1.1.5.5. Cozedura**

No fim da secagem, a peça ainda não possui as propriedades (em particular a resistência mecânica e porosidade) necessárias à sua utilização, sendo necessária uma etapa de cozedura a alta temperatura. Durante este processo ocorrem reações entre as matérias-primas que originam alterações da microestrutura e das propriedades das peças. Isto é conseguido através da utilização de fornos contínuos ou intermitentes em que a temperatura e a atmosfera de cozedura são controlados a cada instante do processo.

No caso de peças vidradas e decoradas, pode existir uma ou mais etapas de cozedura. Na monocozedura, a cozedura do corpo cerâmico, do vidrado e da decoração ocorre em simultâneo. Na bicozedura o suporte cerâmico previamente cozido é vidrado e, seguidamente, submetido a uma segunda cozedura. Em alguns produtos, pode ocorrer um terceiro tratamento térmico para cozedura da decoração [1,2]. A temperatura, tempo e atmosfera de cozedura dependem da composição, tamanho de partícula, grau de homogeneização e características pretendidas para a peça final.

## 1.2. A empresa Grestel

A Grestel é uma empresa sediada na zona industrial de Vagos que fabrica por monocozedura loiça em grés (Figura 12). É uma unidade fabril com cerca de 250 trabalhadores que combina tecnologia avançada com experiência artesanal para produzir loiça utilitária e decorativa. A Grestel produz atualmente cerca de 500.000 peças por mês com formas muito diferenciadas, exportando aproximadamente 98% da sua produção para quase 30 países.



Figura 12 - Entrada da instalação fabril da Grestel.

Para o fabrico das peças, a Grestel adquire as matérias-primas na forma de pasta e de suspensão a uma empresa externa. Os processos de conformação utilizados na produção são o enchimento, a conformação por contramoldagem e a prensagem de pasta plástica (Figura 13). Esta última técnica é utilizada na conformação de cerca de 50% das peças, recorrendo a 12 prensas RAM instaladas na unidade fabril.

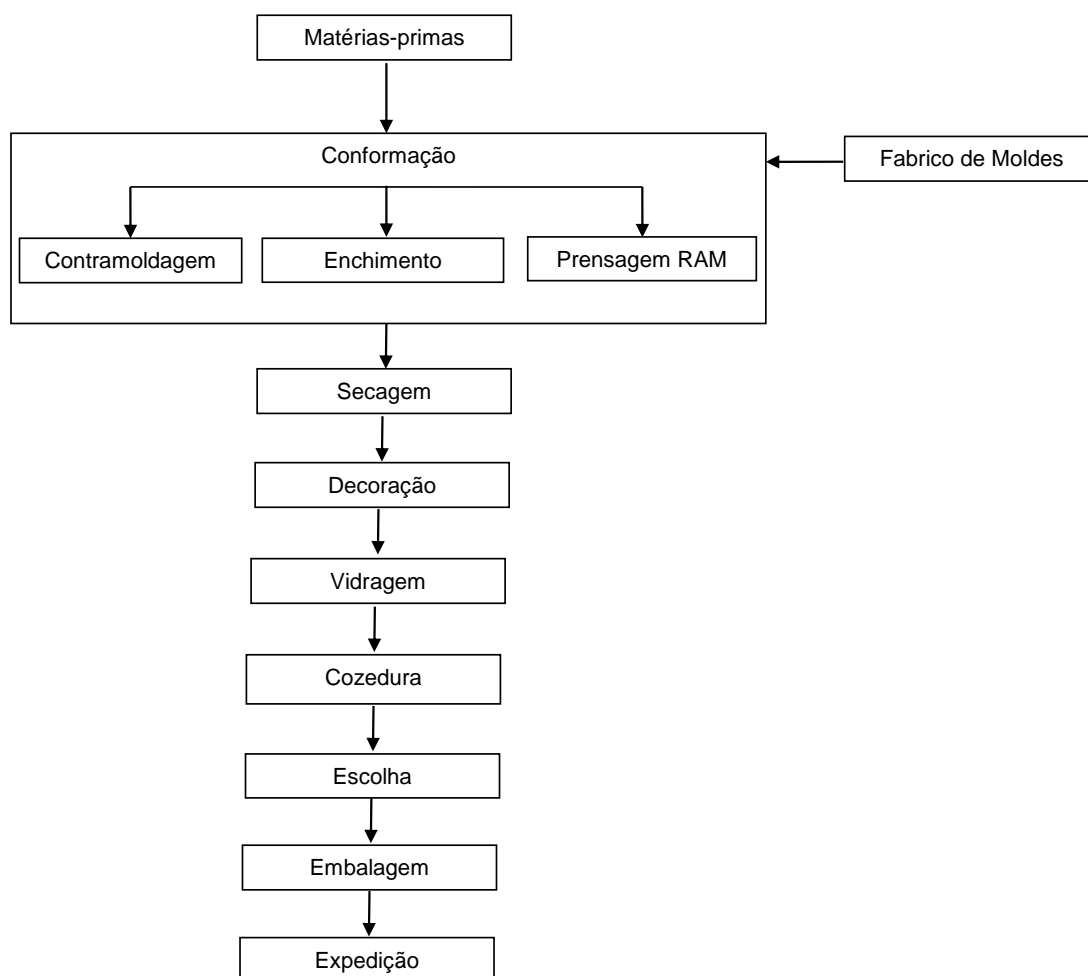


Figura 13: Fluxograma geral de fabrico da Grestel.

A elevada cadência e flexibilidade de produção de peças com formas mais ou menos complexa são os principais fatores para a empresa ter selecionado a prensagem RAM como uma das principais técnicas de conformação dos seus produtos. Com efeito, estas características tornam o processo particularmente adaptado para a produção de pequenas séries de peças com formas muito variadas, permitindo responder de forma mais eficiente e rápida às solicitações dos clientes. No entanto, o desgaste relativamente acentuado do molde de gesso durante as operações de conformação, limita o número de peças que é possível conformar sem alteração dos pormenores e relevo iniciais do molde. Dependendo da forma da peça, características da pasta e condições de prensagem, cada molde de gesso permite a produção de cerca de 500-600 peças antes de necessitar ser

substituído por desgaste [24]. Por esta razão, a empresa pretende avaliar as vantagens económicas e técnicas associadas à substituição dos moldes de gesso, utilizados atualmente, por moldes poliméricos porosos para a conformação por prensagem de pasta plástica. O presente trabalho, realizado durante o estágio curricular com duração de 3 meses, teve como objetivo principal efetuar esta avaliação através da produção de moldes em gesso e moldes poliméricos porosos, sua utilização para a conformação por prensagem de pasta plástica de peças com uma determinada forma e análise comparativa das vantagens e desvantagens da utilização de cada tipo de molde.



## **2. Realização Experimental**





No decorrer do estágio curricular tive a oportunidade de estar envolvido no processo de fabrico da Grestel e acompanhar todo o processo desde a receção das matérias-primas, passando pelos diferentes métodos de conformação, acabamento, decoração e vidragem, escolha do produto e embalagem. A integração na empresa não passou apenas pelo contato com as diferentes etapas do processo de fabrico, mas incluiu também a adaptação à cultura da empresa, cumprimento de horários, relacionamento com os colaboradores e serviços administrativos, etc.

O estágio incluiu a análise da qualidade das peças durante as várias etapas do processo de fabrico, principalmente durante a conformação por prensagem de pasta plástica. Isto envolveu o controlo da dureza da pasta que estava a ser consumida, controlo de espessura das peças, estado dos moldes e pressão de ar para a desmoldagem. Este trabalho revelou-se de extrema importância, pois, permitiu a identificação da causa de defeitos nas peças e implementação de medidas corretivas e preventivas que permitiram uma redução da incidência de defeitos. Envolveu também a elaboração de fichas técnicas para registo das condições de conformação das peças por prensagem plástica como, por exemplo, a pressão de desmoldagem, tipo de pasta, quantidade de pasta e posição da pasta do molde. Este procedimento foi posteriormente estendido à conformação por contramoldagem, tendo sido registada a velocidade de rotações, quantidade de pasta, calibrador utilizado, inclinação da cabeça, recuo, etc. A implementação destes registos permitiu um aumento da reprodutividade do processo e contribuiu de forma significativa para a diminuição dos defeitos de conformação na empresa.

Para além do referido, o presente trabalho envolveu a caracterização das materiais iniciais e a obtenção de moldes de gesso e poliméricos porosos que foram posteriormente utilizados no processo produtivo normal da Grestel para conformar peças em grés por prensagem de pasta plástica. A avaliação das vantagens técnicas e económicas da substituição dos moldes de gesso por moldes poliméricos foi eleccionada através de uma análise comparativa do desempenho em serviço e dos custos de produção de cada um dos tipos de moldes.

A peça inicialmente seleccionada para o estudo foi uma assadeira da linha master, com o código interno WMR291 (Figura 14<sup>a</sup>). A conformação por prensagem de pasta plástica desta peça é bastante problemática, porque apresentava uma percentagem de rejeição elevada devido a fissuras no bordo e empeno, fazendo desta peça o desafio ideal para testar os moldes poliméricos. No entanto, esta peça foi descontinuada antes do final do projecto, tendo havido a necessidade de escolher outra peça de fácil reprodução. Selecionou-se assim um prato da linha lisa com 21 cm de diâmetro final e com referência LSP211 (Figura 14b). A escolha deste prato para conformação por prensagem tem haver com a irregularidade do prato, não podendo ser reproduzidos por contra-molagem.



a)



b)

Figura 14: Imagem das peças utilizadas para a avaliação do desempenho de moldes de gesso e poliméricos porosos para prensagem de pasta plástica. a) Peça WMR291; b) Peça LSP211.

## 2.1. Materiais iniciais

Neste trabalho foram utilizados dois gessos com características diferentes (Gesso A e Gesso B). Por razões que serão apresentadas posteriormente, a Grestel utiliza estes dois gessos para o fabrico dos moldes para prensagem de pasta plástica: para a parte inferior do molde (fêmea) utiliza o Gesso A e para a parte superior (macho) utiliza o Gesso B.

Os moldes poliméricos porosos foram produzidos a partir de dois componentes fornecidos por uma empresa externa: um líquido transparente de

baixa viscosidade (Componente A) e um pó branco (Componente B). Convém referir que a formulação utilizada para a produção dos moldes poliméricos foi especialmente desenvolvida pelo fornecedor para este trabalho, tendo como base uma formulação atualmente comercializada para a produção de moldes poliméricos porosos para enchimento sob pressão.

Os gessos e os componentes utilizados na produção dos moldes foram caracterizados através de microscopia eletrónica de varrimento (SEM), espectroscopia de dispersão de energias (EDS), espectroscopia de infravermelhos com transformada de Fourier (FTIR) e difração de raios X (DRX). Estas técnicas foram também utilizadas para caracterizar os moldes obtidos, complementarmente a ensaios mecânicos de compressão e medidas de absorção de água.

## **2.2. Caracterização dos materiais iniciais e dos moldes**

### **2.2.1. Microscopia eletrónica de varrimento e espectroscopia de dispersão de energias**

Para as observações por SEM e análises químicas por EDS foram realizadas utilizando um microscópio eletrónico de varrimento Hitachi S4100 equipado com um espectrómetro de dispersão de energias Rontec. Os materiais iniciais em pó (Gesso A, Gesso B e Componente B) foram preparados por deposição direta em fita-cola de carbono. As análises das amostras dos moldes foram realizadas em superfícies de fratura, previamente coladas a porta-amostras com cola de carbono. No caso da amostra do molde polimérico, a fratura foi obtida após arrefecimento com azoto líquido. Todas as amostras foram revestidas com um filme condutor de carbono antes das análises.

### 2.2.2. Difração de raios X e espectroscopia de infravermelhos

As análises de difração de raios X foram realizadas em pós dos materiais, utilizando difratômetros Rigaku Geigerflex e PANalytical X'Pert PRO, operando com a radiação  $K\alpha$  emitida por uma ampola de Cu ( $\lambda=1,5405 \text{ \AA}$ ). A velocidade angular utilizada foi de  $4^\circ/\text{min}$ .

As análises FTIR foram realizadas numa gama de número de onda entre  $4000 \text{ cm}^{-1}$  e  $350 \text{ cm}^{-1}$ , utilizando um espectrómetro Brucker Tensor 27 com uma resolução de  $4 \text{ cm}^{-1}$ . No caso do Componente B e do molde polimérico, foram utilizados prensados de misturas de pós dos materiais e KBr. No caso do Componente A, foi utilizada uma amostra prensada de KBr após impregnação com o líquido.

### 2.2.3. Ensaios mecânicos de compressão uniaxial

Os ensaios de compressão uniaxial foram realizados em amostras com seção quadrada com 1 cm de lado e 2 cm de altura. Os ensaios decorreram com uma velocidade de travessão de  $5 \text{ mm/min}$ , tendo sido utilizada uma máquina universal de ensaios de tração uniaxial Shimadzu AG25TA equipada com uma célula de carga de 20 kN e um sistema de aquisição automática de dados que permitiu registar os valores de força (F) e alongamento ( $\Delta l$ ) durante os ensaios. A partir destes valores foram calculadas as curvas nominais de tensão ( $\sigma$ ) – extensão ( $\varepsilon$ ), utilizando as seguintes expressões:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3)$$

onde  $A_0$  e  $l_0$  são, respetivamente, os valores iniciais da área da seção transversal e o comprimento do provete.

#### 2.2.4. Medidas de absorção de água

A determinação da absorção de água foi realizada em amostras previamente secas em estufa a 80°C durante 24 horas. Após pesagem (peso  $P_1$ ) as amostras foram mergulhadas em água em ebulição durante uma hora e pesadas novamente (peso  $P_2$ ). A percentagem de absorção de água foi obtida através da expressão:

$$\% AA = \frac{P_2 - P_1}{P_1} \times 100 \quad (4)$$

### 2.3. Produção dos moldes

#### 2.3.1. Moldes de gesso

Para a produção dos moldes de gesso foram utilizadas madres. Para cada molde foram utilizadas duas madres: uma que deu forma à parte inferior do molde (fêmea) e outra à parte superior (macho). Foi também utilizado um sistema de tubagem em material têxtil permeável, conhecido por cofinho (Figura 15), que foi colocado sobre as madres antes do vazamento do gesso, para a obtenção da permeabilidade necessária à eficaz passagem do ar no momento da desmoldagem. Este aumento da permeabilidade, combinada com a injeção de ar comprimido no sistema de tubagem interna do molde, irá facilitar a expulsão de água absorvida na prensagem e a desmoldagem das peças conformadas.

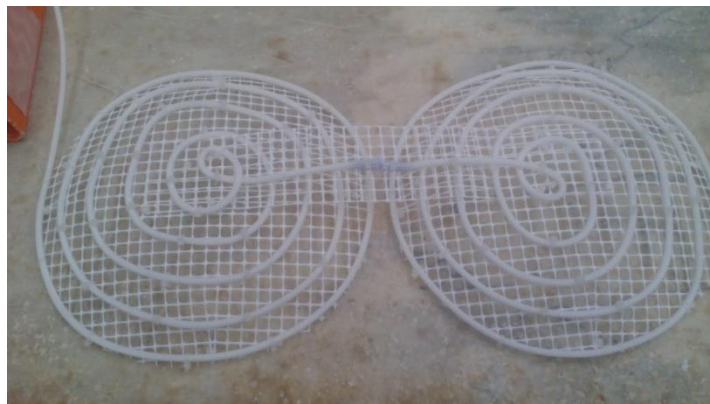


Figura 15 – Sistema de tubagem (cofinho) utilizado na produção dos moldes de gesso

Após colocação do cofinho, que foi suportado por uma armação de arame e ajustado à madre de forma a situar-se entre aproximadamente 20 mm a 25 mm da superfície de trabalho do molde, procedeu-se à preparação da calda com o Gesso A (para a metade inferior do molde) e com o Gesso B (para a metade superior do molde). Esta etapa foi realizada com agitação constante (utilizando equipamento específico, Figura 16) e a uma temperatura ambiente controlada, de forma garantir a homogeneidade da mistura e evitar um endurecimento demasiado rápido do gesso. Para aumentar a uniformidade das características dos moldes, o vazamento da calda para o interior das caixas metálicas, que servirão de estrutura externa aos moldes, ocorreu de forma controlada e continua (Figura 17).

Quando foi registado um aumento de 7-8 °C na temperatura da calda devido à reação exotérmica de hidratação do gesso (eq. 1), iniciou-se o processo de arejamento através da injeção de ar através do cofinho com uma pressão inicial de 0,5 bar e que foi aumentando em 1 bar por minuto até aos 2,5 bar, altura em que se procedeu à remoção das madres e, sem interrupção do fornecimento de ar comprimido, até endurecimento completo do molde. Esta última etapa decorreu com o molde na posição vertical, para favorecer a drenagem do excesso de água utilizada na sua produção (Figura 18) [23].



Figura 16: Equipamento utilizado para a mistura e agitação da calda.



Figura 17 – Vazamento da calda para o interior da caixa metálica



Figura 18 – Etapa final de injeção de ar comprimido durante o processo de produção dos moldes de gesso.

### **2.3.2. Moldes poliméricos**

Os componentes utilizados na produção dos moldes poliméricos porosos requerem um armazenamento em condições ambientais controladas. É recomendado pelo fornecedor que o local de armazenagem esteja protegido da luz solar e que seja mantido a uma temperatura inferior a 19 °C. A água para a mistura deve estar a uma temperatura entre 11 °C e 15 °C, para controlo da velocidade de polimerização e a sala onde decorre o enchimento deve apresentar uma temperatura ambiente compreendida entre os 19 e 21 °C. As madres devem estar à temperatura da sala, devendo a estabilização térmica de todos os componentes ser realizada 48h antes da sua utilização.



Após a limpeza das madres e de todo o material a ser utilizado durante o processo, foram colocadas 4 placas de madeira em torno das madres, de modo a definir uma caixa de enchimento (Figura 19). As placas foram fixas com grampos e vedadas nos pontos de contato com plasticina. Após revestimento da superfície interna da caixa e madre com desmoldante aplicado com pincel e uniformização desta camada através de polimento com pano de flanela, foi colocada uma grelha metálica perfurada que serviu de base de fixação a varetas metálicas com rosca, (Figura 20). Este conjunto de varetas servirá para definir um sistema de canais de distribuição de ar comprimido de desmoldagem no interior do molde.



Figura 19 – Madre com caixa de enchimento.



Figura 20 - Grelha com a colocação das varetas.

A posição das varetas foi escolhida de maneira a assegurar uma distribuição o mais uniforme possível, dando especial atenção às zonas consideradas críticas, mais suscetíveis a defeitos e a dificuldades de



desmoldagem. A colocação das varetas foi efetuada de forma a que as suas extremidades ficassem a cerca de 2 cm da superfície da madre. A grelha contendo as varetas fixas nas posições pretendidas através de porcas foi retirada e o conjunto foi recoberto com desmoldante.

A preparação da mistura envolveu a obtenção de uma suspensão do Componente B, através da adição deste componente a água (Mistura 1) com agitação contínua (Figura 21). Em paralelo foi preparada, uma mistura (Mistura 2) dos Componentes A e B, também com agitação contínua, à qual foi posteriormente adicionada a Mistura 1.



Figura 21 - Mistura do componente B com água.

A mistura resultante foi vazada para o interior da caixa de enchimento, com o cuidado de evitar a formação de bolhas de ar. Ainda com a mistura no estado líquido, foi colocada a grelha com as varetas e efetuada a monitorização da evolução da temperatura da mistura (Figura 22) durante o processo de polimerização. Esta monitorização permitiu o controlo da velocidade da polimerização através do arrefecimento do molde com água e definiu o momento em que a mistura apresentava a rigidez suficiente para a remoção do sistema de varetas.



Figura 22 - Colocação de grelha com varetas e termómetro.

Quando o molde adquiriu uma determinada rigidez (determinada pelo tempo decorrido após vazamento) procedeu-se à sua desmoldagem e imersão em água aquecida até à polimerização completa. Nesta última fase, as partes superior e inferior do molde foram mantidas em contato (molde em posição fechada), para evitar empenos.

Após retificação das bases de cada parte do molde foi maquinado um conjunto de sulcos para interligação do sistema de canais definidos pelas varetas (Figura 23). O molde ficou completo com a fixação de uma placa para vedação do sistema de canais e segurar o molde à prensa, seguida da instalação de ligações metálicas para fornecimento do ar comprimido ao molde.

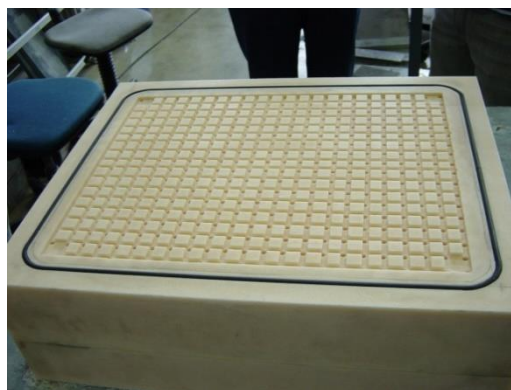


Figura 23 – Conjunto de sulcos obtidos por maquinação da base do molde polimérico para interligação do sistema de canais definidos pelas varetas metálicas.

Antes de entrarem em serviço, os moldes foram lavados através da injeção de ar e água (Figura 24), secos à temperatura ambiente e impermeabilizados pela aplicação de um esmalte industrial sintético em toda a sua superfície, exceto da zona de trabalho (Figura 25). Este isolamento permitiu que o ar de desmoldagem fosse direcionado para a desmoldagem da peça conformada. De referir que durante a lavagem foi observada a formação de um volume significativo de espuma (Figura 24), o que é consistente com a presença de uma substância tensioativa na composição inicial para promover a formação da emulsão.



Figura 24 - Lavagem de molde polimérico com água e ar.



Figura 25 – Impermeabilização do molde com esmalte sintético.



### **3. Resultados e Discussão**



Nas Figuras 26 e 27 são apresentadas as imagens obtidas por SEM dos pós iniciais de gesso utilizados na produção das metades inferior (Gesso A) e superior (Gesso B) dos moldes. Estas imagens mostram que a maioria das partículas do Gesso A apresentam uma forma alongada, típica dos cristais de gesso  $\alpha$ , enquanto que as partículas do gesso B apresentam uma forma mais irregular, típicas do gesso  $\beta$ . Apesar destas diferenças na morfologia, a análise por EDS mostrou em ambos os materiais a presença de cálcio, enxofre e oxigénio (Figuras 28 e 29). De referir que o carbono identificado nos espectros é justificado pelo recobrimento prévio das amostras com este elemento, com o objetivo de promover a redução do efeito de carga durante as análises SEM e EDS.

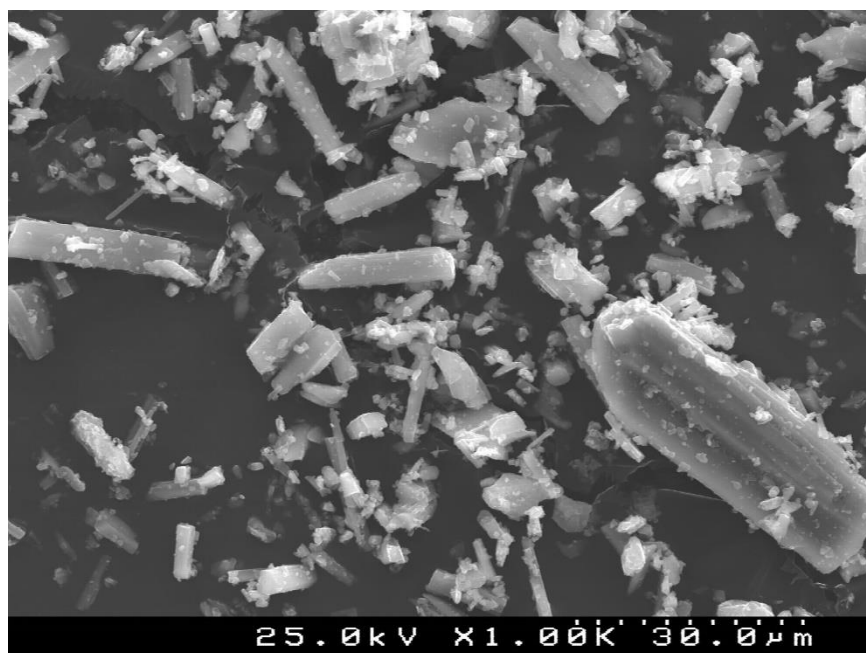


Figura 26 – Imagem obtida por microscopia eletrónica de varrimento do pó inicial de Gesso A, utilizado para a produção da metade inferior dos moldes de gesso.

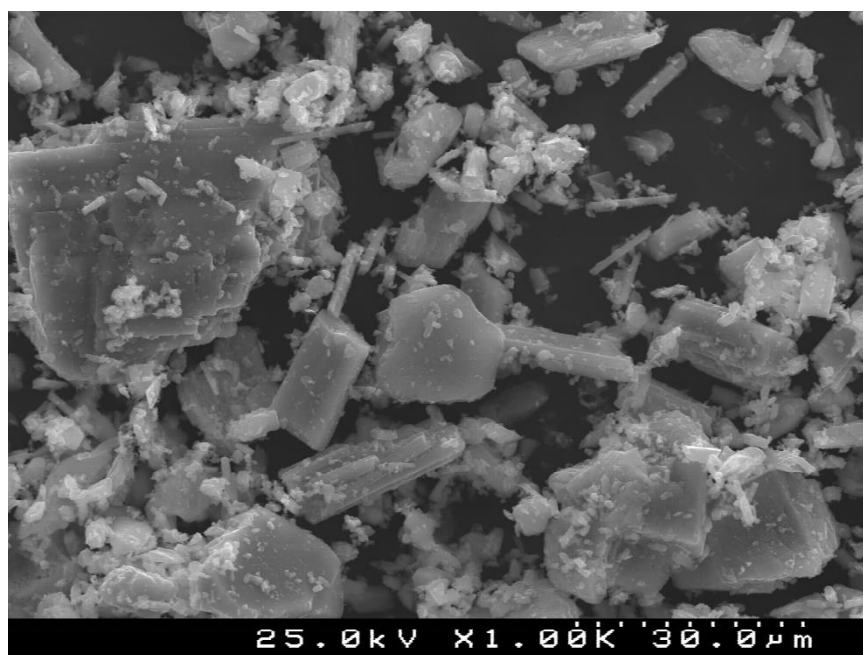


Figura 27 – Imagem obtida por microscopia eletrônica de varrimento do pó inicial de Gesso B, utilizado para a produção da metade superior dos moldes de gesso.

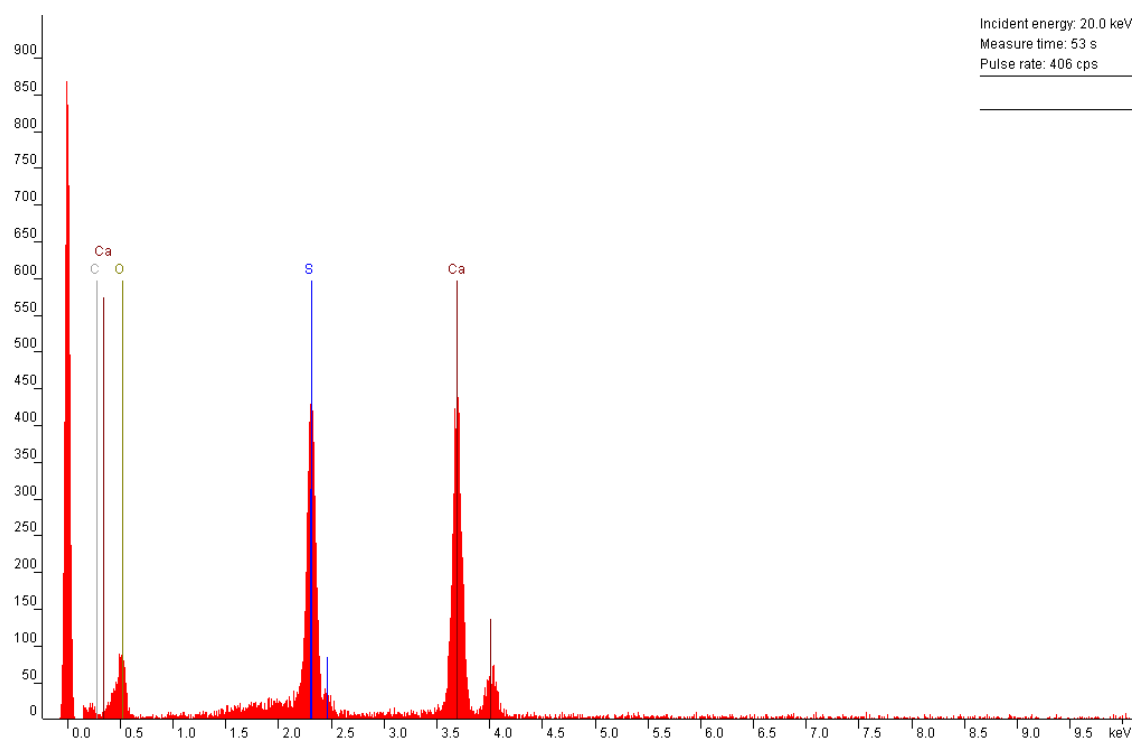


Figura 28 – Espectro de EDS do pó inicial do Gesso A.



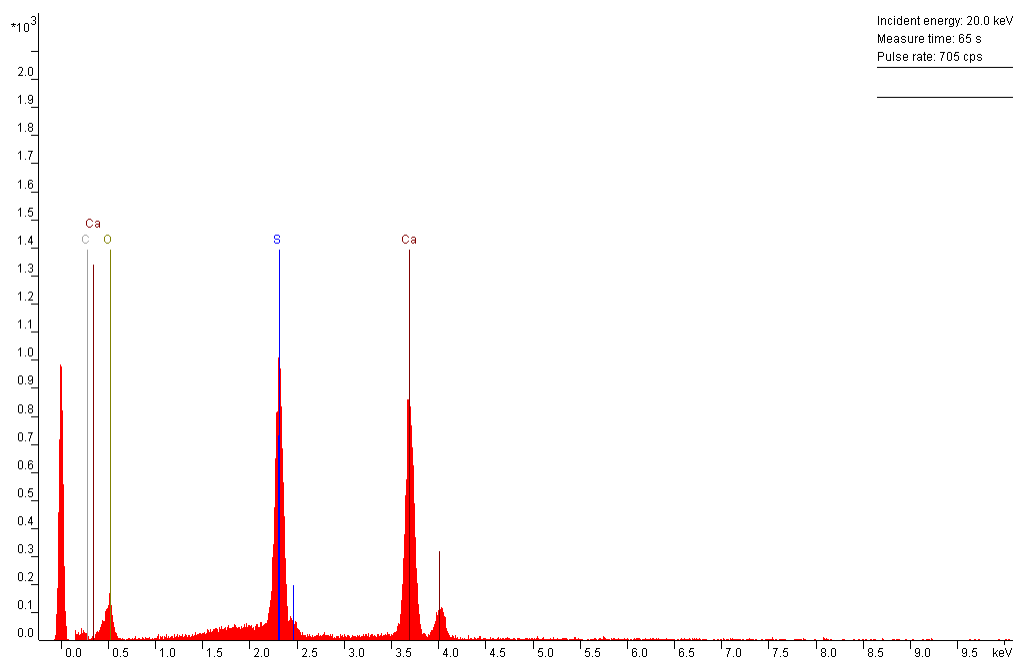


Figura 29 – Espectro de EDS do pó inicial do Gesso B.

Os resultados das análises por difração de raios X (Figuras 30 e 31) permitem confirmar que ambos os gessos são constituídos por cristais de sulfato de cálcio hemi-hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ) que, como foi referido no capítulo 1, é a matéria-prima de base na produção dos moldes de gesso.

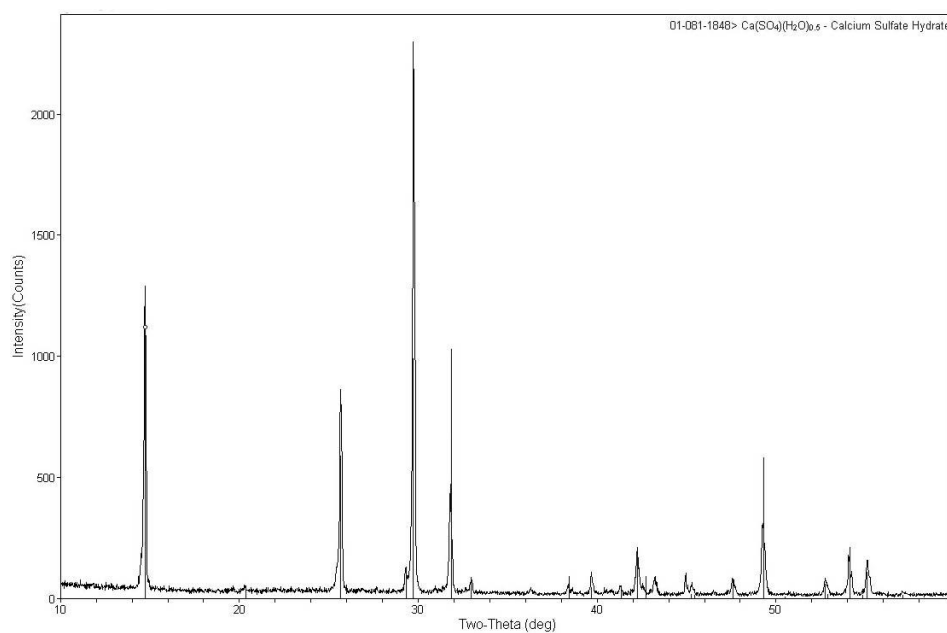


Figura 30 – Difractograma de raios X do pó inicial do Gesso A.

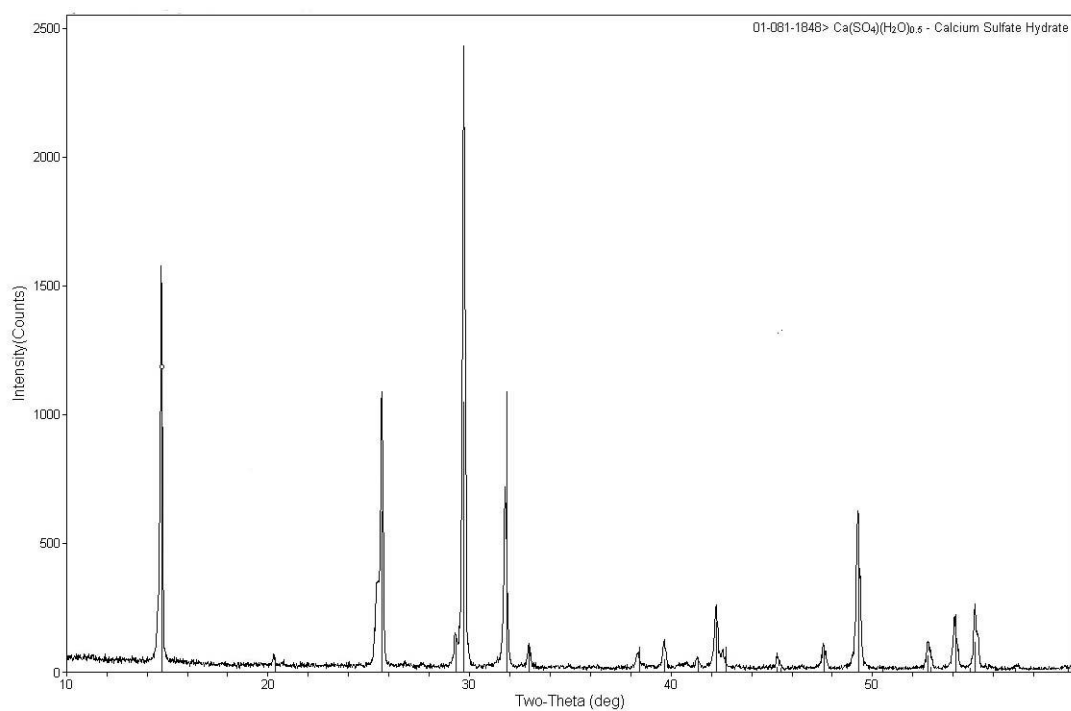


Figura 31 – Difratoograma de raios X do pó inicial do Gesso B.

Relativamente aos componentes utilizados na produção dos moldes poliméricos, as observações por SEM (Figuras 32) permitiram concluir que o Componente B é constituído por esferas com um tamanho que pode atingir cerca de 300  $\mu\text{m}$  de diâmetro, sendo que a maioria apresenta um tamanho de aproximadamente 40  $\mu\text{m}$ .

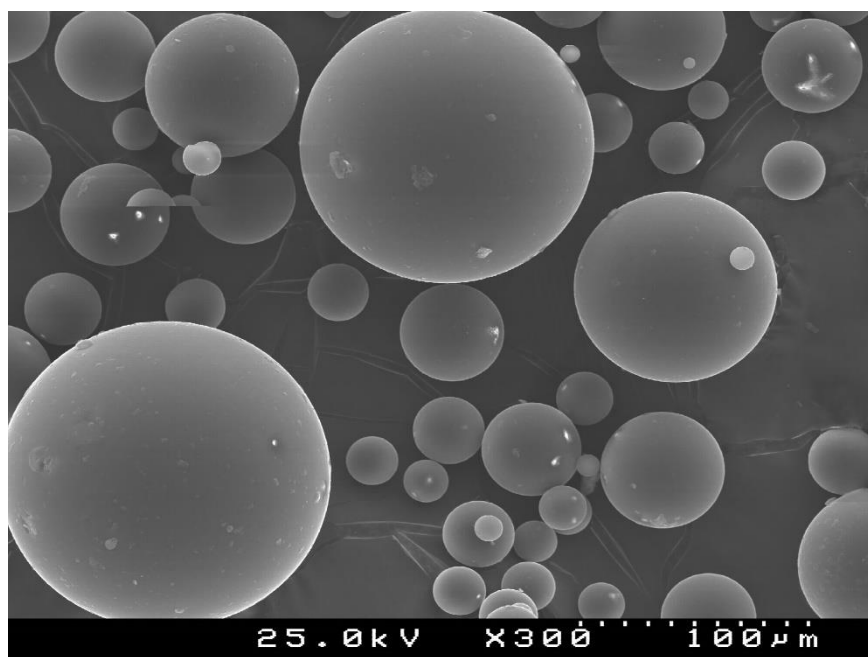
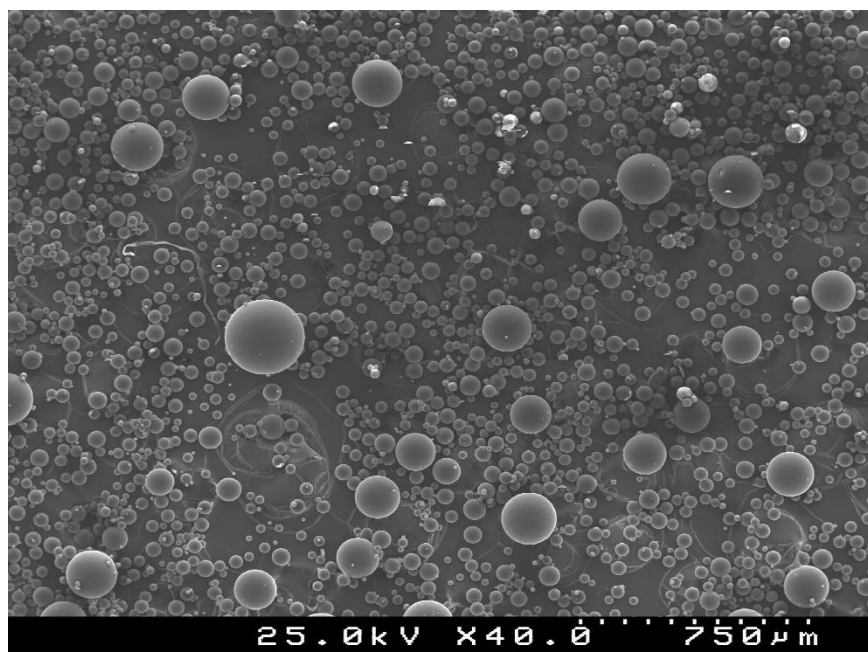


Figura 32 – Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varrimento do Componente B utilizado para a produção dos moldes poliméricos.

A análise dos resultados obtidos por EDS (Figura 33) e por DRX (Figura 34) permitem concluir que este material tem natureza orgânica, tendo sido detetado apenas carbono e oxigénio por EDS e máximos de difração pouco definidos por difração de raios X, característicos de um material polimérico.

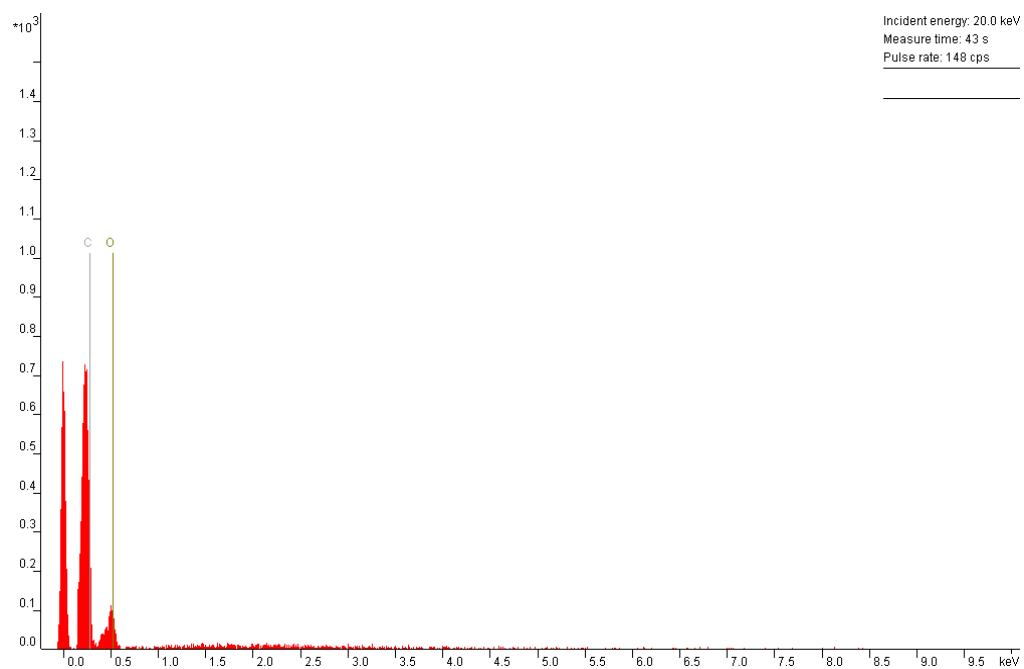


Figura 33 – Espectro de EDS do Componente B utilizado na produção dos moldes poliméricos.

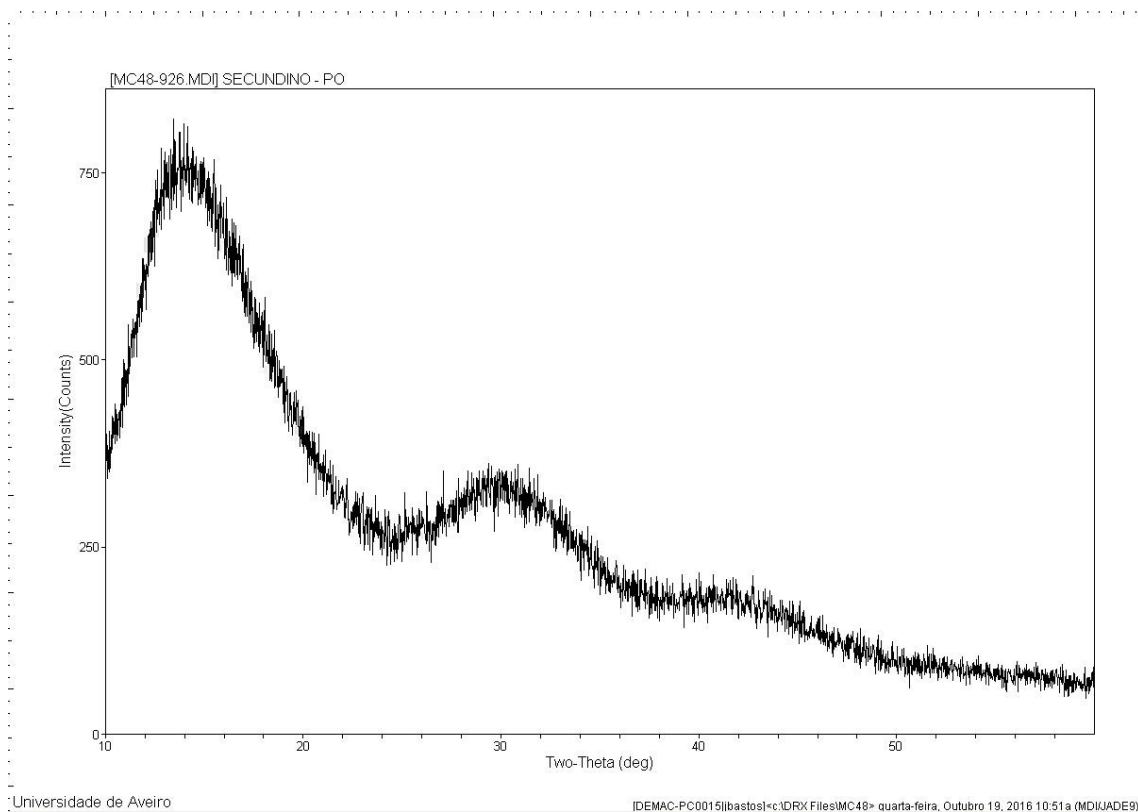


Figura 34 – Difratoograma de raios X do Componente B utilizado na produção dos moldes poliméricos.

Para identificar os constituintes utilizados para a produção dos moldes poliméricos, foram realizadas análises por FTIR de ambos os componentes. Os resultados obtidos (Figuras 35 e 36) mostram que ambos os componentes apresentam bandas de absorção da radiação infravermelha em posições semelhantes nos espectros e que, quase todos, podem ser atribuídos à presença do monômero metil metacrilato (MMA –  $C_5O_2H_8$ ) ou do seu polímero (poli(metil metacrilato) – PMMA –  $[C_5O_2H_8]_n$ ) [20, 24].

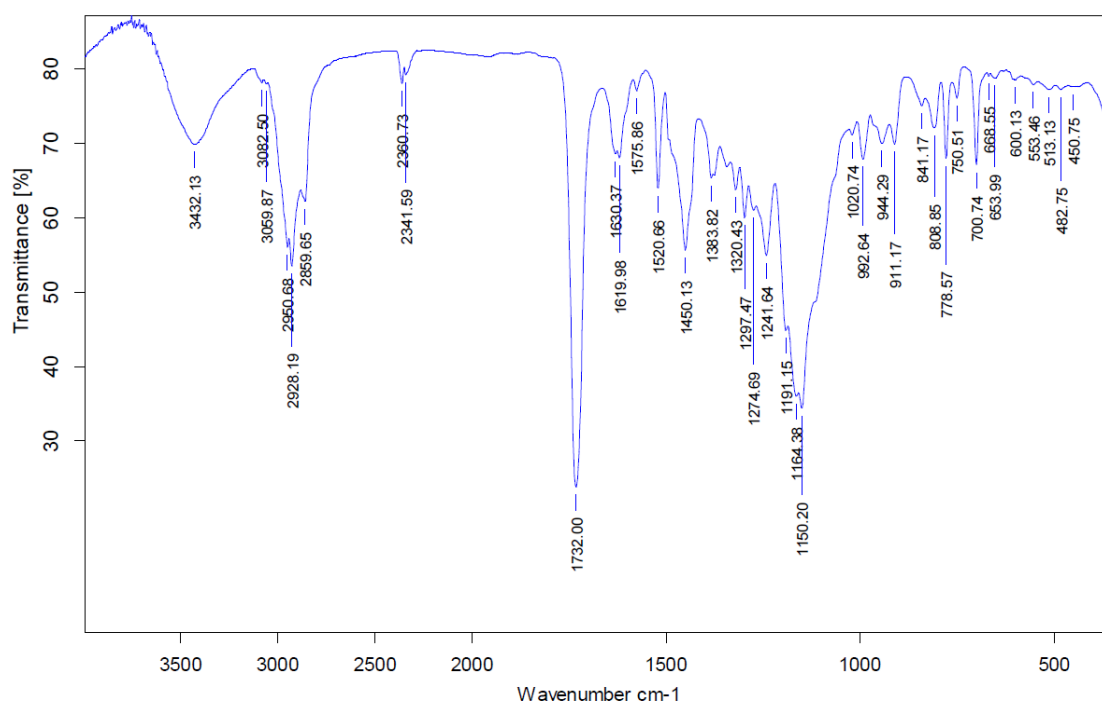


Figura 35 – Espectro FTIR do Componente A utilizado na produção dos moldes poliméricos.

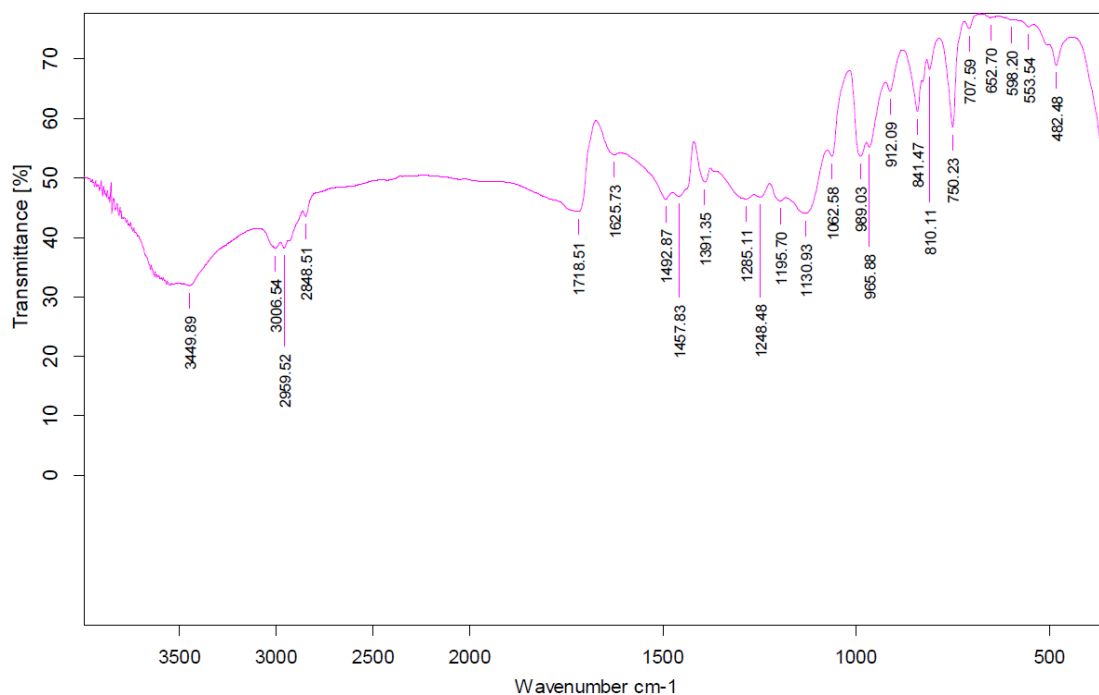


Figura 36 – Espectro FTIR do Componente B utilizado na produção dos moldes poliméricos.

Após o processo completo de presa e secagem, os moldes de gesso apresentam uma microestrutura porosa, constituída por cristais alongados aleatoriamente orientados (Figuras 37 e 38). No caso do molde produzido com o Gesso A, estes cristais apresentam um comprimento e largura típicos de, respetivamente, 20-30  $\mu\text{m}$  e 5-10  $\mu\text{m}$  e no molde produzido com o Gesso B dimensões um pouco inferiores.

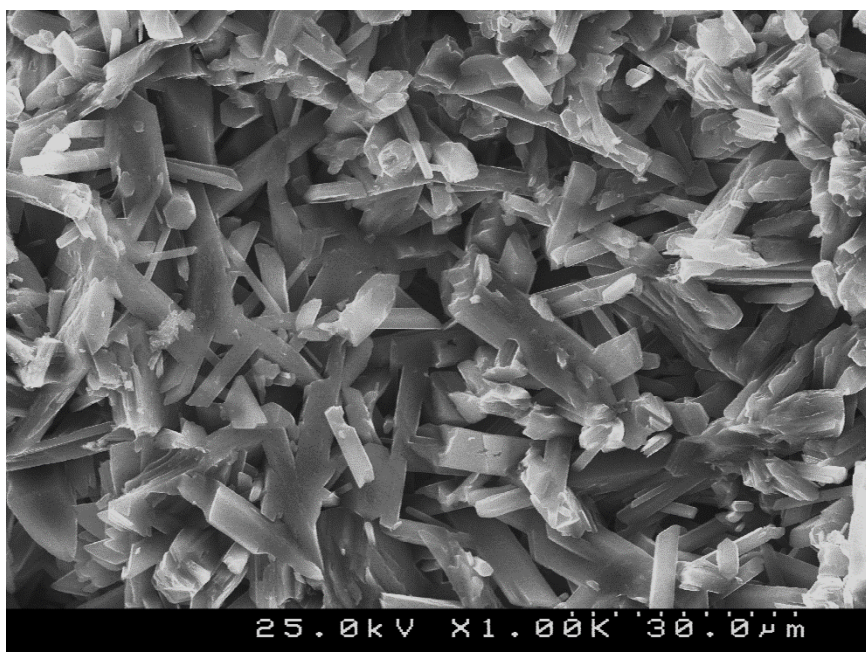


Figura 37 – Imagem obtida por microscopia eletrônica de varrimento da metade inferior do molde (produzida com o Gesso A).

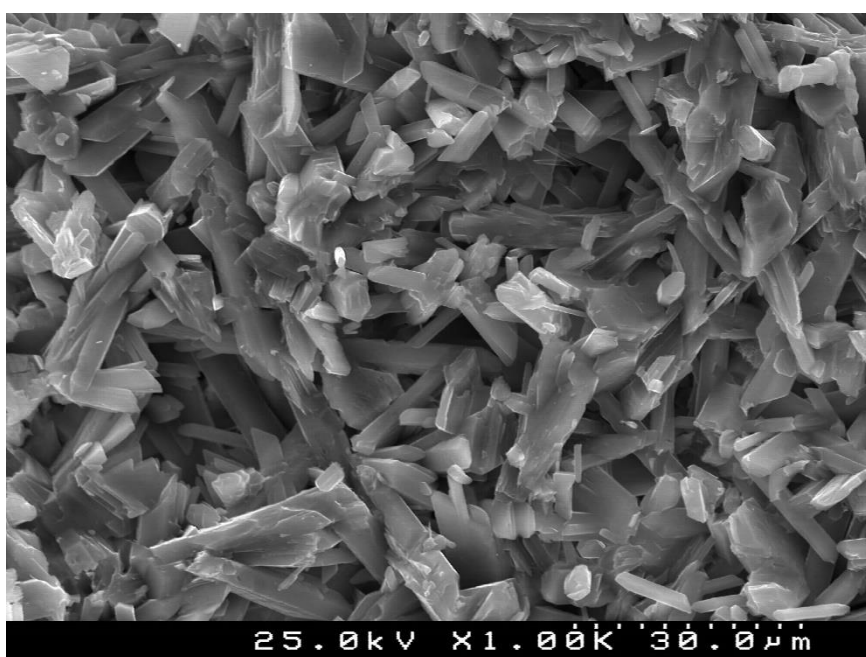


Figura 38 – Imagem obtida por microscopia eletrônica de varrimento da metade superior do molde (produzida com o Gesso B).

Embora, para ambos os moldes de gesso, a análise química por EDS tenha permitido identificar os mesmos elementos que no pó de gesso inicial (Figuras 39 e 40) a análise dos difratogramas de raios X (Figuras 41 e 42) mostra que os moldes são constituídos por cristais de sulfato de cálcio di-hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), tal como previsto pela reação de hidratação traduzida pela equação 1.

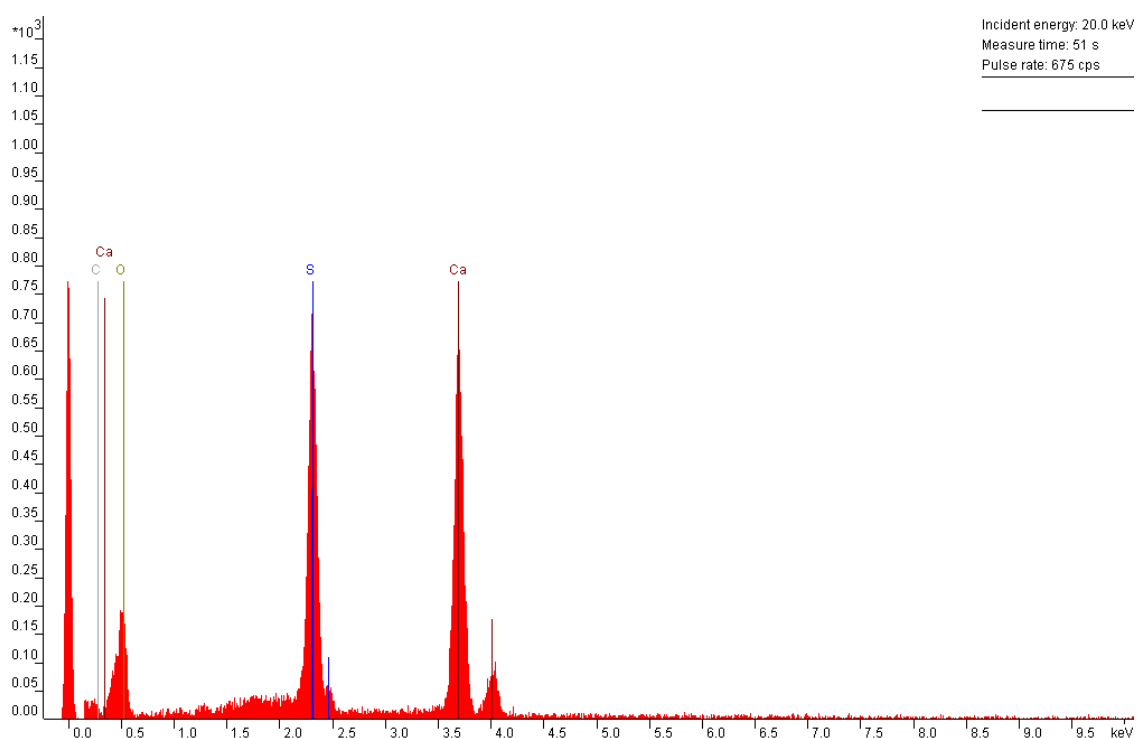


Figura 39 – Espectro de EDS da metade inferior do molde (produzida com o Gesso A).



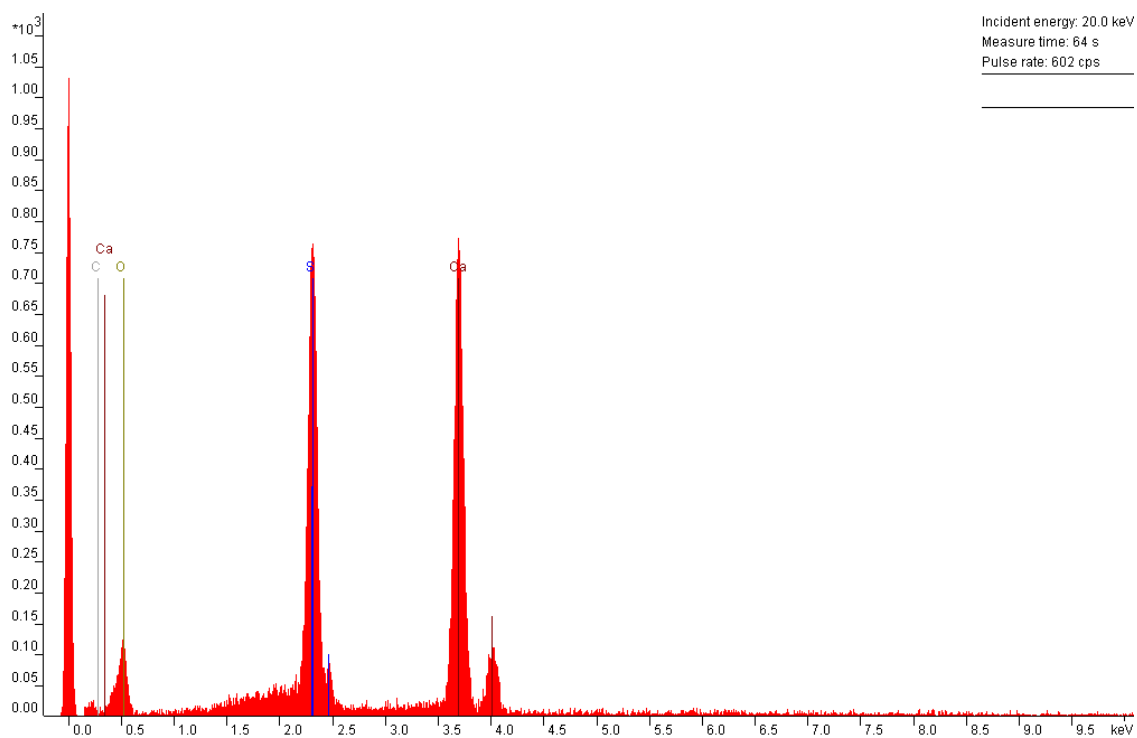


Figura 40 – Espectro de EDS da metade inferior do molde (produzida com o Gesso B).

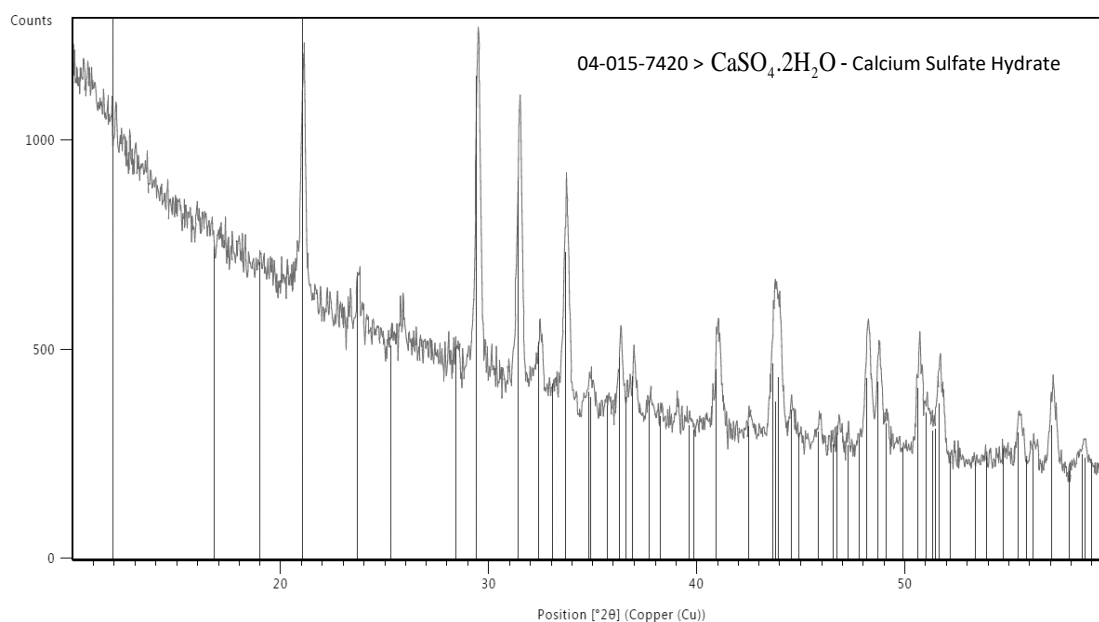


Figura 41 – Difratoograma de raios X da metade inferior do molde (produzida com o Gesso A).

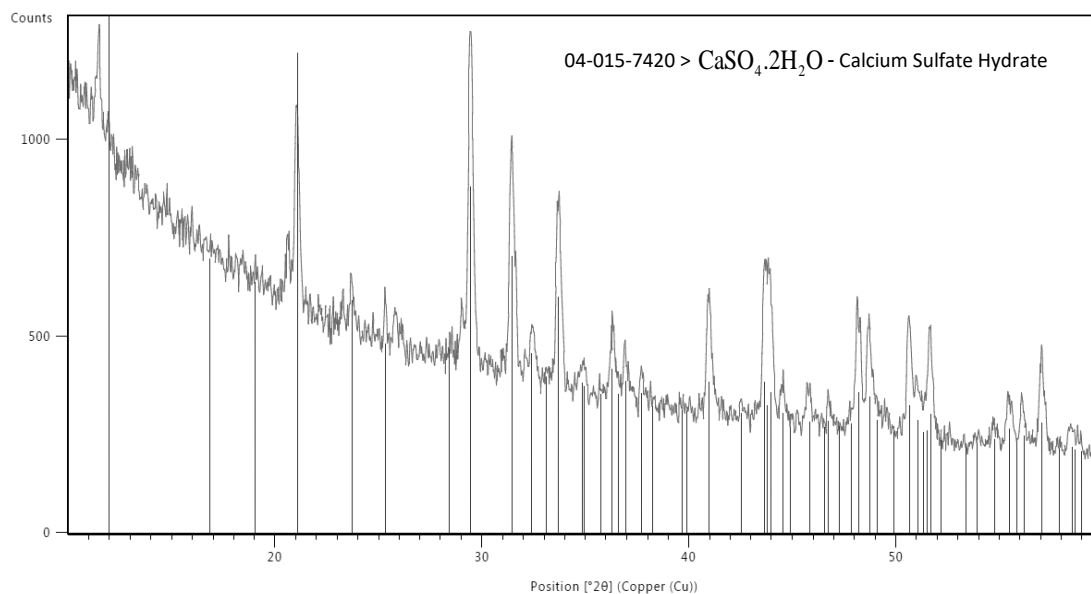


Figura 42 – Difratoograma de raios X da metade superior do molde (produzida com o Gesso b).

A comparação das imagens obtidas por SEM dos moldes de gesso (Figuras 37 e 38) e de polímero (Figura 43) mostram diferenças microestruturas substanciais. Na realidade, este último tipo de moldes é caracterizado pela presença das esferas do componente B envolvidas por uma matriz amorfa (como mostra a análise por DRX da Figura 44), contendo uma rede de poros finamente distribuídos e em que o carbono e o oxigênio foram os únicos elementos identificados por EDS (Figura 45). Estes resultados são consistentes com a conclusão de que o molde é formado por cadeias poliméricas de PMMA (poli(metil metacrilato) –  $[C_5O_2H_8]_n$ ), dada a semelhança do espectro de FTIR obtido para o molde polimérico (Figura 43), nos Componentes A e B (Figuras 35 e 36) e em outros estudos [20, 25].

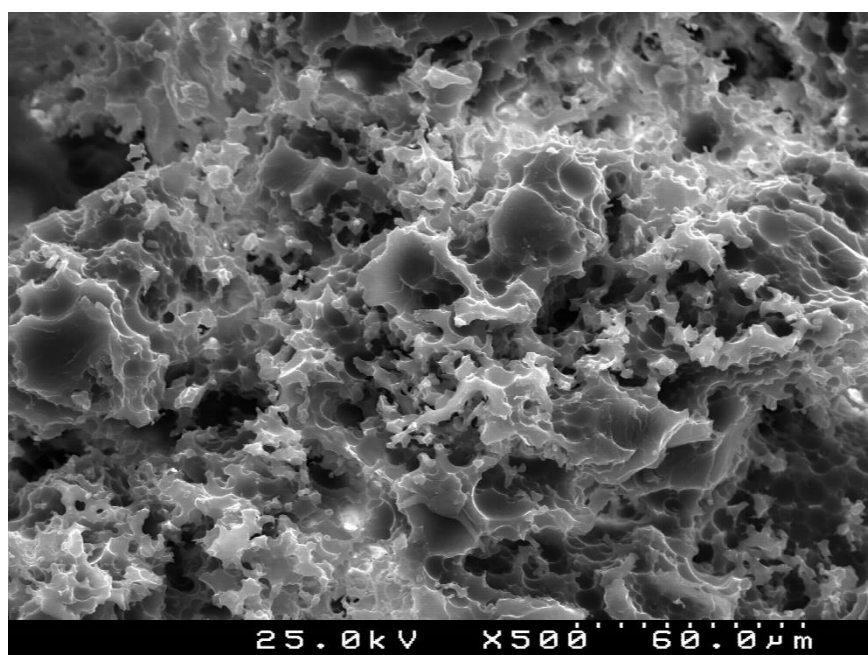
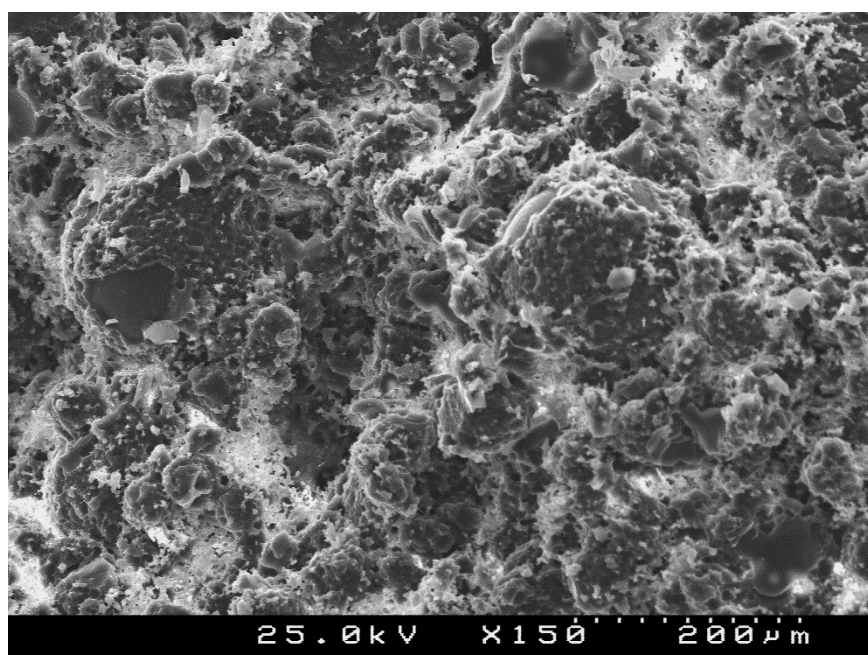


Figura 43 – Imagens do molde polimérico obtidas por microscopia eletrônica de varrimento.

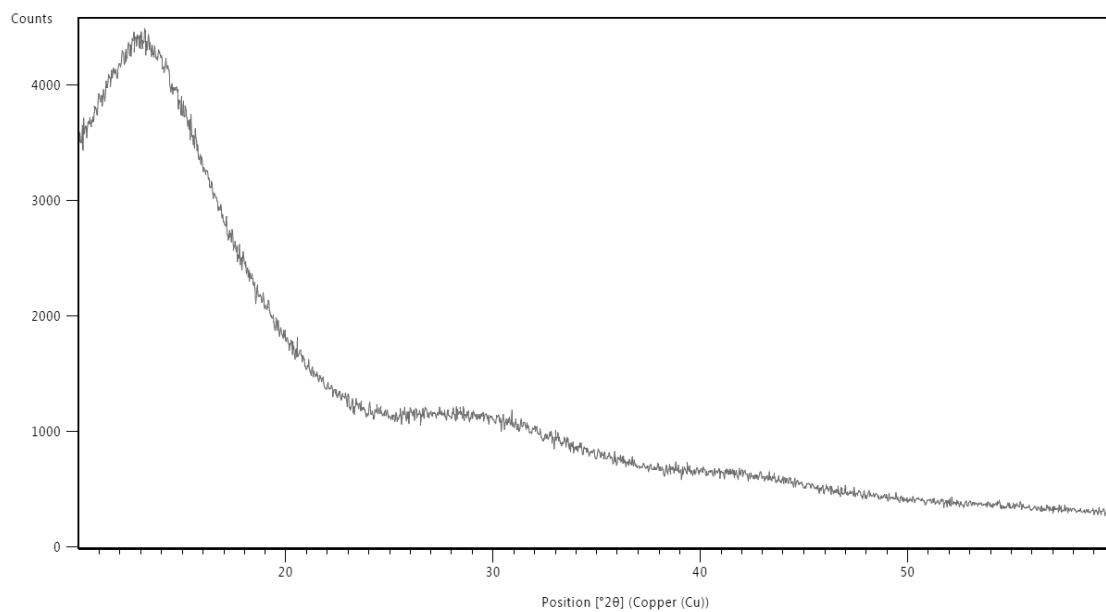


Figura 44 – Difratoograma de raios X do molde polimérico.

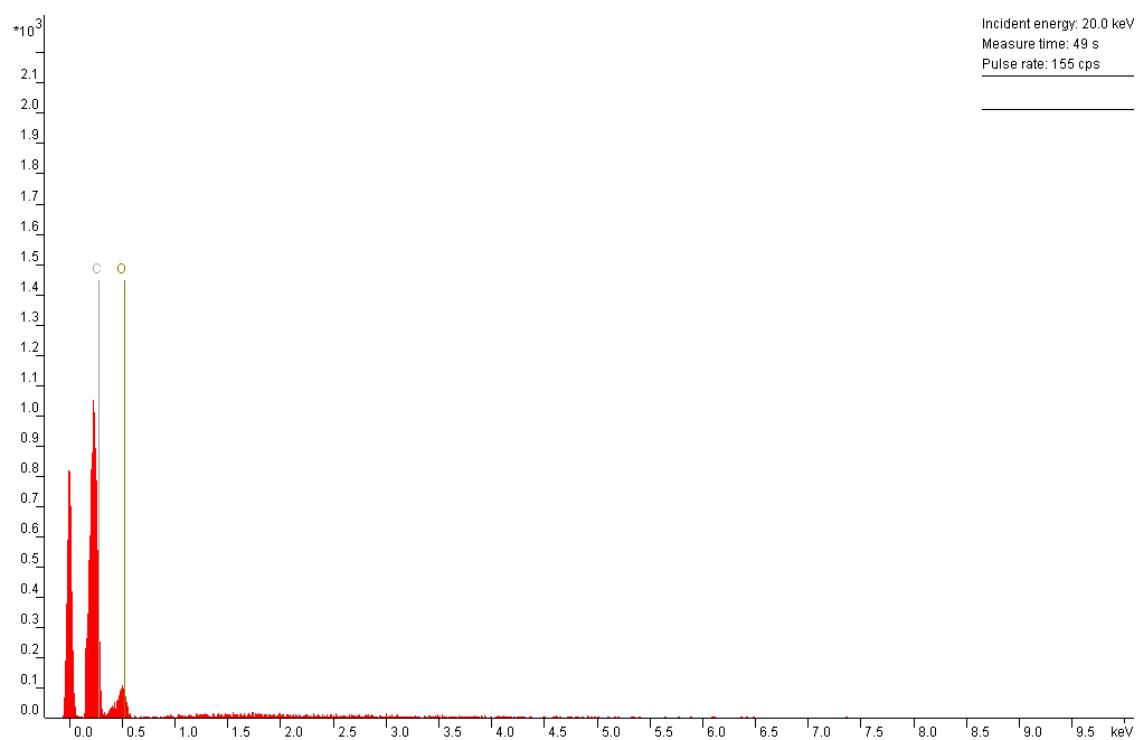


Figura 45 – Espectro de EDS obtido no molde polimérico.

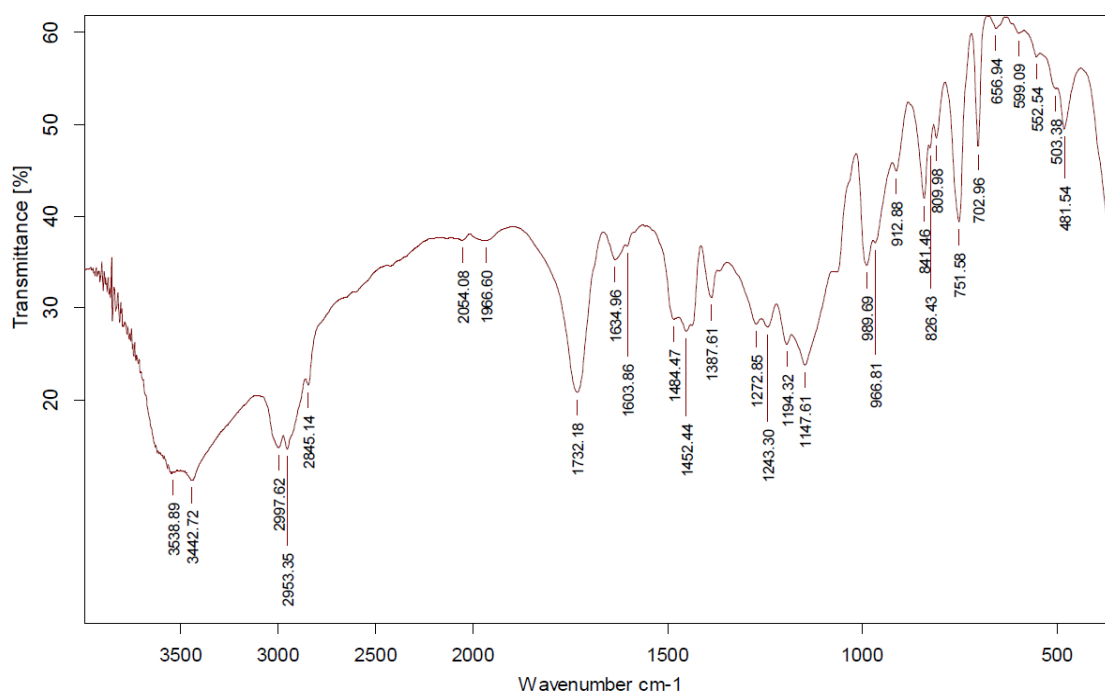


Figura 46 – Espectro FTIR do molde polimérico.

Duas características observáveis por análise SEM do molde polimérico (Figura 43) e que merecem serem realçadas são a forma aproximadamente esférica dos poros e das depressões, com forma de calotes esféricas, nas paredes dos mesmos. Ambos os aspectos são consistentes com a ocorrência de uma polimerização em emulsão, em que a água adicionada durante a preparação do molde se encontra dispersa na forma de gotículas durante o processo de polimerização do molde e é posteriormente eliminada por secagem, dando origem a uma rede interconectada de poros.

Na tabela 3 encontram-se reunidos os valores de absorção de água exibidos pelos diferentes moldes. Para avaliar o efeito da injeção de ar durante a preparação dos moldes de gesso na porosidade aberta dos mesmos, são também apresentados os valores de absorção de água de provetes de gesso preparados sem injeção de ar. Como se pode verificar, o molde polimérico apresenta porosidade aberta maior do que os moldes de gesso preparados com injeção de ar, o que justifica a menor pressão de ar comprimido utilizada na desmoldagem das peças conformadas com o molde polimérico. (Tabela 4). Esta diferença na absorção de água ainda é maior se for comparada com os valores apresentados pelos moldes de gesso preparados sem injeção de ar, o

que mostra a importância desta operação na permeabilidade dos moldes de gesso.

Tabela 3 – Absorção de água dos moldes de gesso e polimérico.

<b>Molde</b>		<b>Absorção de água (%)</b>
Gesso A	(com injeção de ar)	17,5
	(sem injeção de ar)	13,2
Gesso B	(com injeção de ar)	20,0
	(sem injeção de ar)	15,5
Polimérico		26,2

Tabela 4 – Pressão de ar de desmoldagem utilizada na conformação da peça LSP211.

	<b>Molde de gesso</b>	<b>Molde polimérico</b>
Pressão inferior (bar)	2,8	1
Pressão superior (bar)	4,5	4

Outra diferença importante é o menor valor de absorção de água apresentado pelos moldes preparados com o Gesso A do que com o Gesso B. Se, por um lado, isto poderá significar uma maior dificuldade de desmoldagem, por outro lado, deverá proporcionar uma maior resistência mecânica da metade inferior do molde de gesso. Esta hipótese, é confirmada pela análise dos resultados dos ensaios de compressão realizados (Figura 47). De referir que, devido a dificuldades em reproduzir o processo de injeção de ar durante a obtenção dos moldes, as amostras de ambos os gessos utilizadas nestes ensaios foram produzidas sem injeção de ar durante a sua presa. Isto significa

que os valores de resistência à compressão obtidos devem estar sobrevalorizados relativamente aos valores efetivamente apresentados pelos moldes de gesso utilizados na conformação por prensagem plástica.

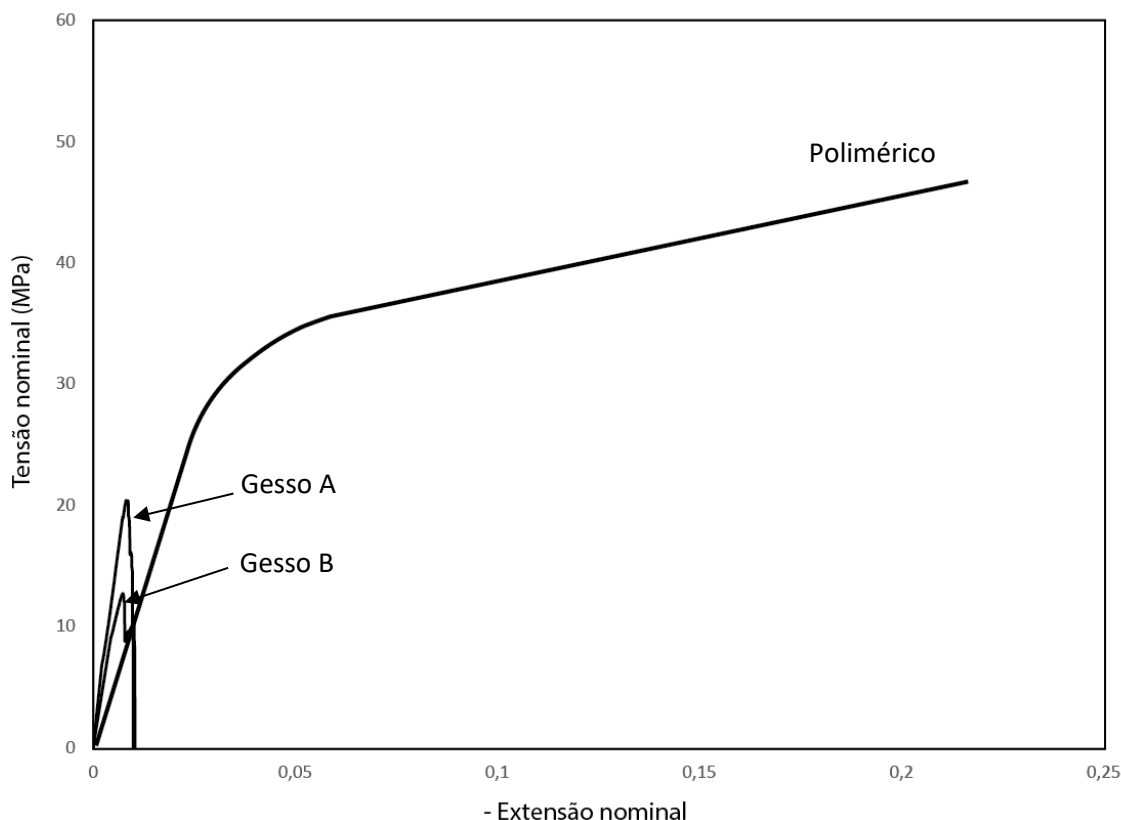


Figura 47 – Curva tensão-extensão nominais em compressão uniaxial de amostras dos gessos e do polímeros.

Numa primeira análise, o menor valor de resistência à compressão do Gesso B poderia sugerir que a vida útil do molde de gesso seria geralmente determinada pela falha mecânica em serviço da metade superior deste. No entanto, verificou-se experimentalmente que a falha em serviço por fissuração ocorria quase sempre na metade inferior do molde (Figura 48). Esta aparente contradição é explicada com o tipo de tensões que são geradas em cada uma das metades durante a prensagem da pasta plástica. Na realidade, devido à forma geralmente côncava da metade inferior do molde, as tensões desenvolvidas na sua superfície são predominantemente de tração, o que favorece a propagação de fissuras durante a prensagem da pasta. Pelo

contrário, a forma convexa da metade superior do molde favorece o desenvolvimento de tensões de compressão na superfície, reduzindo a probabilidade de fissuração.



Figura 48 – Fissuração da metade inferior de um molde de gesso.

Comparativamente com os moldes de gesso, o molde polimérico apresenta valores de tensão limite de elasticidade e de deformação na rotura substancialmente maiores, o que permite prever que a substituição dos moldes de gesso por poliméricos originará um aumento significativo do tempo de vida do molde e a uma redução de defeitos nas peças conformadas devido a falha mecânica em serviço deste. Na realidade, a utilização do molde polimérico na produção da Grestel permitiu a conformação de, pelo menos, 10.200 peças com a referência LSP211, tendo sido retirado da produção em excelente estado apenas por conclusão da encomenda da peça, enquanto que o molde de gesso apenas permitiu conformar 1.000 peças (valor superior à média devido à forma pouco profunda da peça LSP211), antes de ser retirado devido a desgaste excessivo.

Apesar da maior tensão limite de elasticidade, as amostras poliméricas apresentam um módulo de elasticidade menor do que as amostras de gesso. Isto significa que os moldes poliméricos apresentarão uma maior deformação elástica por ação das forças desenvolvidas em serviço que deverá ser



considerada durante a fase de projeto do molde e na definição dos limites dimensionais das peças conformadas com estes moldes.

Outra consequência direta das melhores características mecânicas exibidas pelo molde polimérico é a redução das operações de acabamento para correção de imperfeições das peças conformadas e da necessidade de ajuste da distância mínima entre as metades superior e inferior dos moldes durante a prensagem da pasta. Durante a conformação da peça LSP211 (10.200 batidas) com o molde polimérico nunca houve necessidade de reajuste da espessura das peças. Pelo contrário, na conformação de 1.000 peças da mesma referência com o molde de gesso, esse ajuste teve de ocorrer 6 vezes.

Na Figura 49 é apresentado um exemplo de um defeito típico resultante da fissuração do molde, neste caso na zona do frete. Este tipo de defeito torna o processo de acabamento mais demorado e conseqüentemente diminui a rentabilidade do processo. De forma ideal, o acabamento das peças conformadas por prensagem de pasta plástica deve ocorrer apenas no bordo, local onde a apara é retirada (Figura 50).



Figura 49 – Defeito na zona do frete numa peça (WMR291), devido a fissuração do molde de gesso.



Figura 50 – Peça LSP211 conformada com molde polimérico antes da operação de acabamento do bordo

Outra melhoria detetada durante a utilização do molde polimérico foi na desmoldagem da peça conformada. Na realidade, devido ao processo de produção dos moldes de gesso, não é possível assegurar a reprodutibilidade das suas propriedades e garantir um fluxo uniforme de ar de desmoldagem no interior dos mesmos. Isto traduz-se frequentemente em dificuldades de desmoldagem e, conseqüentemente, defeitos nas peças conformadas. A maior uniformidade e reprodutibilidade da rede de canais para circulação de ar e água no interior do molde polimérico facilita a extração das peças, minimizando distorções durante a desmoldagem. Este aumento da facilidade de circulação do ar no interior do molde polimérico é comprovada pela menor pressão de ar necessária na desmoldagem (Tabela 4) e pela diminuição registada no tempo médio de desmoldagem, que passou de 2,76 s (para o molde de gesso) para 1,64 s (para o molde polimérico).

É de referir que uma elevada pressão de ar para desmoldagem de peças poderá originar a incorporação de ar no interior da peça que poderá resultar durante a cozedura em poros, bolhas de ar na superfície das peças e em empenos. O primeiro tipo de defeitos pode ser corrigidos com operações de acabamento posteriores, mas obriga a uma segunda cozedura, não garantindo a qualidade pretendida para a peça. As bolhas de ar levam à rejeição automática da peça ou sua classificação como de qualidade inferior.

O menor peso do molde polimérico constitui mais uma vantagem relevante. Na realidade, para além da maior densidade aparente do gesso, o molde deste material inclui uma caixa metálica (Figura 51) que aumenta significativamente o seu peso. Os moldes em gesso e em polímero produzidos no âmbito deste trabalho para conformar a peça LSP211 apresentavam, respetivamente, uma massa total (fêmea e macho) igual a 136,5 kg e 55,5 kg. Esta diminuição do peso do molde é particularmente importante nas operações de armazenamento e substituição dos moldes na prensa, refletindo-se de forma positiva na produtividade e flexibilidade do processo de conformação por prensagem de pasta plástica, em particular na produção de pequenas séries de peças (onde a substituição dos moldes é mais frequente).



Figura 51 – Fêmea molde de gesso utilizado na produção da peça WMR291.

Para além de contribuírem para o peso do molde, as caixas metálicas requerem processo de recuperação (Figura 52) e retificação de empenos provocados durante o processo de reciclagem que aumentam os custos de produção dos moldes de gesso.



Figura 52 – Operação de recuperação da caixa metálica de um molde de gesso.

Tendo em conta apenas os custos de produção de cada tipo de molde e o número de peças produzidas a substituição dos moldes de gesso por moldes poliméricos apresenta vantagens também económicas (Tabela 5). Nestes cálculos teve-se em conta os custos das matérias-primas (quantidade e preço), custos associados às operações de acabamento (retificação das bases e maquinagem dos sulcos para interligação do sistema de canais para transporte do ar no interior do molde polimérico) e de mão-de-obra para produção do molde (4 pessoas durante 30 min e 2 pessoas durante 90 min, respetivamente, para o molde de gesso e polimérico). Os valores totais estimados mostram que o molde polimérico tem um custo aproximadamente 10 vezes superior à do molde de gesso (423,99€ e 42,46€ respetivamente). No entanto, esta diferença é compensada por um número substancialmente superior de peças produzidas com o molde polimérico. Com a conformação de 10.200 peças, o custo associado à produção do molde polimérico por peça conformada foi semelhante ao valor estimado para o molde de gesso. No entanto, é importante lembrar que o molde gesso após a conformação das 1000 peças apresentava um nível de desgaste que impedia a sua reutilização, enquanto que o molde polimérico não apresentava sinais significativos de desgaste após a conformação das 10.200 peças. Estimando que, se a peça LSP211 tivesse sido mantida em produção, o molde polimérico poderia ser utilizado para a

conformação de 15.000 peças. Neste caso, o custo associado à produção do molde polimérico por peça conformada seria quase metade do custo associado à produção do molde de gesso. Isto mostra que a substituição dos moldes de gesso por moldes poliméricos é economicamente vantajosa apenas para produção de número elevado de peças ao longo da sua vida útil (pelo menos cerca 10 vezes superior ao número das mesmas peças conformadas com moldes de gesso). Nos cálculos efectuados não foram contabilizados os custos de mudanças de moldes.

Tabela 5 – Estimativa dos custos de produção totais e por peça conformada (LSP211) dos moldes de gesso e polimérico.

	<b>Molde de gesso</b>	<b>Molde polimérico</b>
Custo matéria-prima (€)	35,80	334,00
Custo de acabamentos (€)	0	80
Custo com mão-de-obra (€)	6,66	9,99
Custo total de produção do molde (€)	42,46	423,99
Nº de peças (LSP211) conformadas	1.000	10.200
Custo por peça (€)	0,042	0,041

Devido a todas as vantagens identificadas neste trabalho, a empresa Grestel iniciou o processo de substituição parcial (para produção de grandes séries de peças ou séries mais frequentemente produzidas) dos moldes de gesso por moldes poliméricos.



## **4. Conclusões**





Este trabalho, realizado no âmbito de um estágio curricular na empresa Grestel, cuja produção é dedicada ao fabrico peças de louça utilitária e decorativa de grés, teve como objetivo principal a avaliação das vantagens da substituição de moldes de gesso por moldes poliméricos porosos para a conformação por prensagem de pasta plástica.

Para o efeito, foram produzidos moldes em gesso e em polímero poroso que foram utilizados no processo normal de fabrico da Grestel para conformar por prensagem de pasta plástica o mesmo tipo de peça (LSP211). Foram também caracterizadas as matérias-primas utilizadas na produção de ambos os tipos de moldes utilizando microscopia eletrónica de varrimento (SEM), espectroscopia de dispersão de energias (EDS), espectroscopia de infravermelhos com transformada de Fourier (FTIR) e difração de raios X (DRX). Estas técnicas, juntamente com ensaios mecânicos de compressão e medidas de absorção de água, foram também utilizadas para caracterizar os moldes obtidos.

A caracterização das matérias-primas permitiu concluir que a obtenção do molde de gesso envolvia uma reação de hidratação de cristais de sulfato de cálcio hemi-hidratado molde de gesso (originando cristais de sulfato de cálcio di-hidratado) e que a obtenção do molde polimérico envolvia uma reação de polimerização em emulsão de PMMA e água.

Medidas de absorção de água mostraram que o molde polimérico apresentava uma maior porosidade aberta do que os moldes de gesso, permitindo justificar o menor valor de pressão de ar e tempo necessários para a desmoldagem das peças conformadas com o primeiro tipo de molde.

Concluiu-se ainda que a resistência à compressão do molde polimérico era significativamente superior à do molde de gesso, tendo sido registado durante a conformação com o primeiro tipo de molde uma diminuição das operações de ajuste da espessura das peças e um aumento de, pelo menos 10 vezes, na vida útil do molde.

O menor peso dos moldes poliméricos (55,5 kg do molde poliméricos e 136,5 kg do molde de gesso) refletiu-se de forma positiva na produtividade e flexibilidade do processo de conformação por prensagem de pasta plástica, em particular na produção de pequenas séries de peças (onde a substituição dos moldes é mais frequente).

Tendo em conta apenas o custo de produção dos moldes e o número de peças conformadas, a substituição dos moldes de gesso por moldes poliméricos é economicamente vantajosa para a produção de número elevado de peças ao longo da sua vida útil (pelo menos cerca 10 vezes superior ao número das mesmas peças conformadas com moldes de gesso).

A realização deste estágio curricular permitiu-me também conhecer melhor o funcionamento de uma empresa cerâmica, especificamente da Grestel, através do acompanhamento diário do processo produtivo.

## Bibliografia

- [1] - João Baptista, Darlindo Lucas, Introdução à tecnologia cerâmica, Universidade de Aveiro.
- [2] – James S. Reed, Introduction to the principles of ceramic processing, John Wiley & Sons, 1988.
- [3] – C.S.F. Gomes, Argilas – aplicações na indústria, O Liberal, Câmara de Lobos, 2002
- [4] – C.S.F. Gomes, Argilas – o que são e para que servem, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1988.
- [5] - W. D. Kingery, Introduction to ceramics, John Wiley & Sons, 1960
- [6] - Terry A. Ring, Fundamentals of Ceramic Powder Processing and Synthesis, Academic Press, 1996
- [7] – F.H. Norton, Elements of ceramics, 2ª edição, Addison-Wesley, London, 1974.
- [8] – Manuel J. Ribeiro, António A. L. Ferreira, João Labrincha, Aspectos fundamentais sobre a extrusão de massas de cerâmicas vermelhas, Cerâmica Industrial, 2003
- [9] - [http://www.ceramicaindustrial.org.br/pdf/v03n03/v3n3\\_4.pdf](http://www.ceramicaindustrial.org.br/pdf/v03n03/v3n3_4.pdf), (acedido a 12-01-15)
- [10] - Manuel J. Ribeiro, José M. Ventura, João A. Labrincha, A atomização como processo de obtenção de pós para a indústria cerâmica, Cerâmica Industrial, 2001
- [11] – Arthur H. Lefebvre, Atomization and sprays, Taylor and Francis, 1989
- [12] – Rosa, Tsukada, Secagem por atomização na indústria alimentícia: fundamentos e aplicações, 2006

- [13] – Milton L. H. Vieira, Modelagem de um sistema de controlo por lógica difusa empregado na secagem por atomização de produtos cerâmicos, Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.
- [14] – Manuel J. Ribeiro, João C. C. Abrantes, Filtroprensagem de pastas cerâmicas: influência de algumas variáveis do processo, Cerâmica Industrial, 2013
- [15] – António T. Fonseca, Tecnologia do processamento cerâmico, Universidade aberta, 2000
- [16] – Wellington M. Kanno, Propriedades mecânicas do gesso de alto desempenho, Universidade de São Paulo, 2009
- [17] – Patente nº 5522717
- [18] - Patente nº GB1458203
- [19] - Patente nº EP0516224
- [20] - Y. Ergun, Development and characterization of PMMA based porous materials used for high pressure casting of sanitaryware ceramics, Tese Mestrado, Izmir Institute of Technology, Turkey, 2004.
- [21] – D.J. Shaw, Introduction to colloid & surface chemistry, 4ª edição, Butterwoeth-Heinemannm, Oxford, Reino Unido, 2003.
- [22] – T.F. Tadros, Emulsions: Formation, Stability, Industrial Applications, Walter de Gruyter GmbH, Berlin, Germany, 2016
- [23] – Informação fornecida pela empresa Grestel
- [24] – G. Duan, C. Zhang, A. Li, X. Yang, L. Lu e X. Wang, Preparation and characterization of mesoporous zirconia made using a poly(methyl methacrylate) template, Nanoscale Research Letter, 3, 118-122, 2008.